NOVEMBER 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

www.spektrum.de

PHYSIK

Der Ursprung der Materie

Noch immer rätseln Forscher, wie die Materie sich im Urknall gegen die Antimaterie durchsetzte

SONDERTEIL

Innovation in Deutschland

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Alt werden, aber nicht alt sein

Jeder will lange leben, aber kaum jemand will auch alt sein. Dabei folgt Letzteres ja offenkundig aus Ersterem. Das Dilemma ist offensichtlich und von Woody Allen lakonisch auf den Punkt gebracht: »Ich möchte nicht durch meine Filme unsterblich werden, sonder einfach dadurch, dass ich nicht sterbe.« Allens Motto könnte unseren Beitrag über das Alter einleiten (S. 70). Darin untersuchen zwei Forscher der amerikanischen National Institutes of Health, wie die Gene unser Alter bestimmen und was wir selbst dazu beitragen können, um älter zu werden.

Dabei zum Beispiel ist nach wie vor unklar, ob es für Menschen eine Obergrenze ihrer Lebensspanne gibt. Obwohl dies viele glauben, sind alle Prognosen über ein theoretisches Maximalalter in den letzten achtzig Jahren stets übertroffen worden. Den Weltrekord hält derzeit die Französin Jeanne Calment, die den Maler Vincent van Gogh als junges Mädchen kannte. Sie verstarb vor sieben Jahren im Alter von 122 Jahren, offenbar bis zu ihrem Lebensende guter Dinge. Dank laufend verbesserter Lebensumstände scheint die theoretische Obergrenze auch damit noch nicht erreicht zu sein.

Sollen wir uns darüber freuen? Nicht jeder wird, wie Jeanne Calment, mit 100 noch radeln, mit 119 das Rauchen aufgeben (»aus Altersgründen«) oder mit 121 noch eine Rap-CD einspielen. Tatsächlich sind alte Menschen bestimmten biologischen und mentalen Verfallsprozessen ausgesetzt, denen auch die moderne geriatrische Medizin oft nur bedingt Einhalt gebieten kann. Ein langes Alter in Siechtum wäre jedoch lediglich inhuman und niemandem zu wünschen. Umso wichtiger, dass Forscher derzeit in großen Programmen entschlüsseln wollen, was »altern« eigentlich bedeutet: wie etwa das Absterben einzelner Zellen oder Gewebeteile mit dem Tod des Organismus zusammenhängt; oder welche Gene in welcher Weise unsere Lebensspanne regulieren. So ist es vor allem an der Molekularbiologie, die Degeneration unserer »verderblichsten Teile« aufzuklären und einzudämmen. Damit wir einmal nicht nur älter werden, sondern dann auch alt sein wollen.



Am kommenden Freitag, dem 29. Oktober, erhält unser Mathematikredakteur Christoph Pöppe von der Deutschen Mathematiker-Vereinigung den diesjährigen Medienpreis für seine Arbeiten zur Popularisierung seines Fachs. Den Journalismuspreis der DMV erhält Hubertus Breuer, langjähriger Mitarbeiter von »Spektrum«, für seinen Artikel über die Mathematik des Origami-Faltens in der »Zeit«. Die Preise werden in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften in Berlin verliehen (www.mathematik.de/dmv/medienpreis). Wir gratulieren!

NOVEMBER 2004

Titelbild: Als im Urknall Materie mit Antimaterie kollidierte, blieb ein Rest, aus dem heute unsere Welt besteht – Galaxien, Sterne, Planeten und Menschen
Titelgestaltung: Siganim / Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 24

PALÄONTOLOGIE

Flugsaurier – warmblütige Pioniere der Lüfte

Einst beherrschten geflügelte Echsen die Lüfte. Manche von ihnen hatten Flügelspannweiten wie kleinere Passagierflugzeuge

SEITE 44

HIRNFORSCHUNG

Lernen im Schlaf – kein Traum

Nachts kann das Gehirn ungestört vom Bombardement der Sinneseindrücke die Neuigkeiten des Tages verarbeiten und Wichtiges dauerhaft im Gedächtnis verankern

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 52

ARCHÄOASTRONOMIE

Der geschmiedete Himmel

Die 3600 Jahre alte Himmelsscheibe von Nebra gilt als älteste konkrete Darstellung der Gestirne. Sie wirft ein neues Licht auf astronomisches Wissen und Weltbilder der Bronzezeit-Menschen

SEITE 60

MEERESÖKOLOGIE

Die Erschöpfung der Weltmeere

In wenigen Generationen ist der einst unermessliche Reichtum des Ozeans durch Überfischung auf kümmerliche Reste zusammengeschrumpft

SEITE 70

ALTERNSFORSCHUNG

Das Wunder der über 120-Jährigen

Das Altern beruht vor allem auf der Ansammlung schädlicher Stoffwechselprodukte in Form freier Radikale. Damit zeichnen sich erstmals realistische Möglichkeiten ab, das menschliche Leben zu verlängern



TITELTHEMA KOSMOLOGIE UND TEILCHENPHYSIK SEITE 32

Der Ursprung der Materie

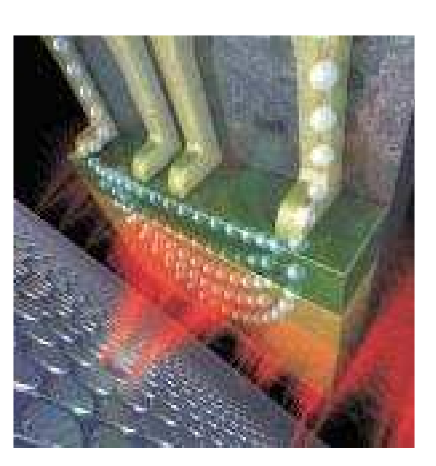
Noch immer gibt es keine befriedigende Antwort auf die Frage, warum bei der Entstehung des Universums weit mehr Materie als Antimaterie entstand. Theoretiker suchen den Grund in subtilen Brechungen der Symmetrie zwischen fundamentalen Teilchen

SEITE 76

FESTPLATTEN

Nanosensoren

Um auf Festplatten mehr Informationen zu speichern, brauchen sie noch sensiblere Leseköpfe. Der »außergewöhnliche Magnetowiderstand« (EMR) ist ein viel versprechender Kandidat





NACH SEITE 82

SONDERTEIL

Innovation in Deutschland

Jagd auf Gravitationswellen · Tissue Engineering bei Knorpelschäden · Drahtlose Breitbandkommunikation · Mit Proteinchips Krebsmarker aufspüren · Neue Fertigungsverfahren für Solarzellen u. a.

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM …

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Die Emanzipation der Technik

Zwischen Gelehrten und Handwerkern entstand eine »technische Intelligenz«, die vor allem an Großprojekten ihr Rüstzeug entwickelte.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Nachruf Gerard Piel

Der ehemalige Herausgeber des Scientific American starb im September.

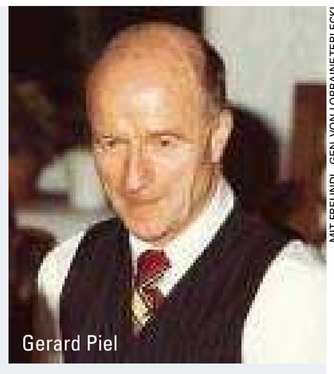
Am 5. September starb Gerard Piel, der frühere Herausgeber des Scientific American, im Alter von 89 Jahren an den Folgen eines Schlaganfalls. Obwohl er kein naturwissenschaftliches Fach, sondern Geschichte studiert hatte, kann sein Einfluss auf die naturwissenschaftliche Bildung gar nicht hoch genug eingeschätzt werden.

1947 kaufte Piel mit seinen Kollegen Dennis Flanagan und Donald H. Miller sowie einer Investorengruppe den Scientific American. Das altehrwürdige Magazin hatte schon seit 1845 über Erfindungen und Entdeckungen berichtet, doch seine neuen Besitzer verfolgten ehrgeizigere Pläne.

Piel als Herausgeber, Flanagan als Chefredakteur und Miller als Geschäftsführer machten den Scientific American wieder zu einem anspruchsvollen Forum für die Vermittlung von Wissenschaft. Obwohl die Hauptartikel von Fachwissenschaftlern geschrieben wurden, richtete sich das Magazin an eine breite, allgemein interessierte und gebildete Leserschaft.

Gerard Piel glaubte fest daran, dass die ganze Welt an den Früchten der Wissenschaft teilhaben sollte: Dank seines Engagements werden heute Ausgaben des Scientific American in über 18 Ländern veröffentlicht. In seinen Augen sollte wissenschaftliche Vernunft auch Leitbild für die Politik sein. So veröffentlichte das Magazin in den 1970er Jahren eine Reihe von Artikeln, die sich im Namen der Ratio für atomare Abrüstung aussprachen.

1984 trat Piel aus Altersgründen als Verleger des Scientific American zurück, blieb aber noch ein Jahrzehnt lang Ehrenvorsitzen-


Gerard Piel

MIT FREUNDL. GEN. VON LORRAINE TERLECKI

der. Daneben war er Präsident der »American Association for the Advancement of Science«.

Gerard Piel war eine herausragende Persönlichkeit im Journalismus und förderte die Entwicklung der Wissenschaft, so weit es ein einzelner Mensch nur zu tun vermag.

Die Redaktion

Funkelnde Täuschung

Wissenschaft im Alltag
Mai 2004

Zirkon-»Edelsteine«

Zirkon wird hier mit Zirkonia verwechselt.

Zirkon ist ein Zirkoniumsilikat ($ZrSiO_4$), das natürlich vorkommt und früher als Imitation von Diamant verwendet wurde. Im 18. Jh. war es als »Matara Diamant« nach dem Fundort auf Ceylon bekannt. Zirkon hat eine geringe Härte und einen viel niedrigeren Brechungsindex und Dispersion als Diamant.

Zirkonia ist dagegen Zirkoniumdioxid (ZrO_2). Seine kubisch stabilisierte Hochtemperaturmodifikation, die synthetisch hergestellt wird, ist die derzeit am meisten verbreitete Diamantimitation.

Zirkonia schmilzt erst bei zirka 2700 °C (je nach Literatur) und wird für Schmuckanwendungen zusammen mit Yttriumoxid geschmolzen und in Einkristallen gezüchtet. Das Yttriumoxid dient zur Stabilisierung der kubischen Modifikation. Anderenfalls würde sich die kubische Phase beim Abkühlen in die tetragonale und dann in die monokline umwandeln und den Kristall dabei zerstören.

Dr. Andreas Kurtze, Wattens, Österreich

Die Zeit vor dem Urknall

August 2004

In diesem Artikel von G. Veneziano ist mir ein Fehler aufgefallen. Im Kasten »Kleiner Kurs in Stringtheorie« auf S. 34 wird die Analogie zwischen Strings und Violinsaiten beschrieben. Es wird ausgeführt, dass durch Verkürzen einer Violinsaite die Frequenz und die Energie ihrer Schwingung erhöht würde. Das stimmt jedoch nur, soweit es die Frequenz betrifft. Hingegen ist die Energie einer klassischen Schwingung unabhängig von der Frequenz.

Dr. Rainer Huber, Bad Zwischenahn

Nach uns die Eiszeit

Juli 2004

Mehr CO_2 ohne Einfluss auf Treibhauseffekt

Eine Vermehrung des CO_2 hat praktisch keinen Einfluss auf den Treibhauseffekt mehr. Die entscheidende sehr breite CO_2-Absorptionslinie liegt bei einer Wellenlänge von 15 Mikrometern und ist für einen Treibhauseffekt von zirka 7 Grad verantwortlich. Diese Linie ist aber in ihrem Zentrum bereits nach 100 bis 200 Meter Bodenluft absolut dicht. Lediglich an ihren Flanken ändert sich noch ein wenig. Bei einer Verdoppelung des CO_2-Gehalts ist demnach zu erwarten, dass sich der Treibhauseffekt um etwa 0,2 Grad erhöht, mehr nicht! Es ist, wie wenn man über einen schwarzen Vorhang vor dem Fenster noch einen zweiten hängt: Es wird dadurch im Zimmer nicht »noch dunkler«!

Außerdem ist in dem Buch von Ludolf Schultz »Planetologie. Eine Einführung« ein Diagramm über den CO_2-Gehalt der in antarktischem Eis eingeschlossenen Luft bis zurück auf das Jahr 1740 zu finden. Danach muss bereits vor dem »anthropogenen Einfluss«, dessen Beginn man grob bei etwa 1860 ansetzen kann, der CO_2-Gehalt der Luft erheblich angestiegen sein. Dafür kommen nur andere Quellen wie Vulkanismus und Ausdünstung von sedimentierter Biomasse in Betracht.

Somit stellt sich die Frage, ob der Begriff »anthropogener Treibhauseffekt« wirklich wissenschaftlich genügend abgesichert oder nur Polemik ist, und ob die viel beschworenen dramatischen Auswirkungen

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

überhaupt real sind. Es ist nämlich zu befürchten, dass fehlerhafte Prognosen die Politik zu riesigen Anstrengungen an der falschen Stelle veranlassen, die dann zwangsläufig verpuffen.

Dr. Ing. G. Wedekind, Immenstaad

Unseriöser Bezug auf das Jahr 1990

In Ihrem sehr interessanten Artikel haben Sie mit keinem Wort die Kernenergie erwähnt, die in Deutschland eine Entlastung von 165 Millionen Tonnen CO_2 bewirkt. Der überall verwendete Bezug auf das Jahr 1990, mit dem Deutschland seine Erfolge bei der CO_2-Reduktion öffentlichkeitswirksam darstellt, ist unseriös. Dieser Rückgang ist zu einem sehr großen Teil durch Anlagenstilllegungen in den neuen Bundesländern bedingt, zum Teil auch durch den Ersatz älterer Braunkohlekraftwerke durch das Energieunternehmen Vattenfall.

Dr. Ludwig Lindner, Marl

Titelbild

Leserbriefe, Oktober 2004

Sehr gewundert habe ich mich über den Leserbrief zum Titelbild der Juliausgabe. Mir hat der Artikel über den Klimawandel sehr gefallen, und ich war froh, mich zu diesem aktuellen Thema so einfach und fachlich hochwertig informieren zu können – zumal Bekannte mich als Wissenschaftlerin mehrfach fragten, ob diese Klimakatastrophe wirklich in naher Zukunft über uns hereinbrechen kann. Dass Sie das Titelbild des Kinofilms gewählt haben, bedeutet ja nicht, dass Ihre Zeitschrift die Botschaft des Films teilt. Als Titelbild fand ich das Bild sehr stimmungsvoll und etwas provokativ (im Sinne von diskussionsfördernd). Ein bisschen Selbstironie und Sinn für Humor kann meiner Meinung nach auch einem Wissenschaftler nicht schaden. Ich bin froh, dass SdW den Mut hat, manchmal auch populäre Themen wissenschaftlich zu diskutieren.

Larissa Tetsch, Bonn

Erratum

Freuds Wiederkehr

Oktober 2004

Im farbigen Hirnbild (S. 79 unten) ist uns ein Hinweisstrich verrutscht. Die untere frontale Hirnrinde ist der rote Bereich.

Die Redaktion

Streit um das Ende der Dinosaurier

August 2004

Wenn Biologen und Nichtbiologen ein Phänomen diskutieren, in dem anorganische und organische Faktoren wirken, sind die Denkstrukturen oft nicht kompatibel. Alvarez, der Vater der Meteoritentheorie, suchte als Physiker nach einer einzigen Ursache für das gleichzeitige Aussterben vieler Tiergruppen. Biologischem Denken entspricht dagegen ein multikausales Geschehen mit mehreren, vernetzten Ursachen.

Wer eine einzige Ursache annimmt, muss die Gleichzeitigkeit aller Wirkungen beweisen. Im Bereich der Kreide/Tertiär-Grenze beträgt die Unschärfe, je nach Methode, mindestens zehntausend Jahre. Das ist mehr als der Wechsel vom Maximum einer Kaltzeit zu dem einer Warmzeit während des Eiszeitalters. Ökologische Fragestellungen können in diesem Rahmen kaum mehr beantwortet werden.

Ob eine oder mehrere Ursachen das »Massensterben« bewirkten, kann durchaus untersucht werden. Dazu sind zwei Fragestellungen wichtig: Warum haben die »Dinosaurier« (und Ammoniten) alle früheren Katastrophen dieser Art überstanden, aber nicht diese? Worin unterscheiden sich nahe verwandte Arten oder Gruppen so sehr, dass die eine ausstarb, die andere nicht (zum Beispiel Dinosaurier und Krokodile)?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Krokodile müssen gegenüber Dinosauriern einen Vorteil gehabt haben, der ihnen das Überleben sicherte.

Die Paläontologie verdankt der Meteoritentheorie einen gewaltigen Forschungsimpuls und, vor allem in den USA, nicht unerhebliche Geldmittel. Fortschritte muss es aber nicht nur in den Befunden, sondern auch in der Fragestellung geben, sonst wird der Streit zur Glaubenssache und zunehmend mit unwissenschaftlichen Mitteln fortgesetzt.

Dr. Kurt Heißig, München

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Peter John, Michael Vogel.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, 22706708 (BLZ 600 700 70)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

ARCHÄOLOGIE

Ältestes Mordopfer

▶ Die Steinklinge (Pfeil) in einer 14500 Jahre alten Wirbelsäule zeugt von gewaltsamen Auseinandersetzungen bei den Frühmenschen.

■ Anthropologen gehen davon aus, dass mit dem Sesshaftwerden des Menschen kriegerische Konflikte vorprogrammiert waren. Den konkreten Beweis dafür blieben sie bisher freilich schuldig. Doch jetzt gibt es ihn. Schon bei einem der ältesten bekannten sesshaften Völker überhaupt – den Natufiern, die vor 14500 Jahren im Jordantal lebten und bisher als friedliebend galten – stießen Archäologen von der Universität Bordeaux und der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) auf einen Fall von tödlicher Gewalt. Opfer war ein Mann mittleren Alters, dessen Überreste bereits 1931 in der israelischen Kebara-Höhle gefunden wurden und sich heute im Peabody-Museum in New Haven (Connecticut) befinden. Als Fanny Bocquentin und Ofer Bar-Yosef die Gebeine nun erstmals gründlich untersuchten, entdeckten sie in einem erhaltenen Stück der Wirbelsäule die Spitze eines Wurfgeschosses. Die Position des sichelförmigen Projektils im siebten oder achten Brustwirbel legt nahe, dass der Mann aus der Nähe angegriffen wurde und die Waffe entweder seinen linken Lungenflügel oder das Herz und die Aorta durchbohrte. Auch bei zwei weiteren unter den insgesamt 17 Skeletten aus der Höhle fanden sich Schädelbrüche oder andere schwere Verletzungen. Nach Ian Kujit von der Universität Notre Dame (Indiana) muss jedoch nicht unbedingt ein kriegerischer Konflikt die Ursache sein. Seiner Ansicht nach könnte auch ein Familiendrama dahinterstecken.

(Journal of Human Evolution, Bd. 47, S. 19)

TECHNIK

Roboter mit Appetit auf Fliegen

■ Einen Fleisch fressenden Roboter haben Wissenschaftler der Universität von Westengland in Bristol entwickelt. Seine Energie bezieht der kreisrunde, tellergroße »EcoBot II« aus gewöhnlichen Fliegen, mit denen seine acht Brennstoffzellen gefüttert werden. Hier zerlegen Klärschlammbakterien das Chitin im Panzer der Tiere enzymatisch in Zucker, den sie anschließend zur Energiegewinnung verstoffwechseln. Dabei werden Elektronen frei, die sich zur Stromerzeugung nutzen lassen.

Zu den Schnellsten gehört EcoBot II nicht. Alle zwölf Minuten hat er genügend Energie gesammelt, um sich um ganze zwei Zentimeter fortbewegen zu können. Das entspricht einer Durchschnittsgeschwindigkeit von zehn Zentimetern pro Stunde. Dafür ist der Roboter äußerst genügsam: Mit einer Mahlzeit von acht Fliegen kommt er fünf Tage über die Runden.

Die fleischliche Kost bringt den Vorteil, dass EcoBot II unabhängig von Batterien agieren kann. »Zukünftig brauchen wir autonome Roboter, die gefährliche Aufgaben an unzugänglichen Orten erledigen«, erklärt Forschungsleiter Chris Melhuish. Bis dahin müssen die Wissenschaftler ihrem Geschöpf aber noch beibringen, die Fliegen selbst zu fangen, indem es sie etwa durch Pheromone anlockt.

(Universität von Westengland, 9.9.2004)



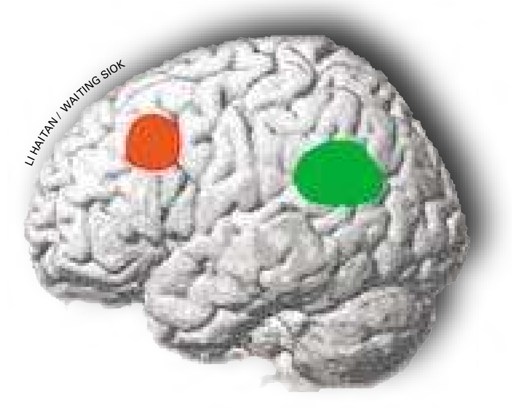
IAS ECOBOTTEAM / UNIVERSITÄT VON WESTENGLAND

◀ Man sieht es ihm nicht an, aber dieser Miniroboter kann sich von Fliegen ernähren.



HIRNFORSCHUNG

Leseschwäche auf Chinesisch



LI HAITAN / WAITING SIOK

▲ Bei chinesischen Legasthenikern ist ein anderes Gehirnareal (rot) zu wenig aktiv als bei europäischen (grün).

■ Legastheniker gibt es in allen Kulturen. Je nach Sprache und Schriftsystem scheinen allerdings andere Gehirnareale für die Lese- und Rechtschreibschwäche verantwortlich zu sein. Das hat jetzt ein Forscherteam um Li Hai


FANNY BOCQUENTIN, UNIVERSITÄT BORDEAUX

Tan an der Universität Hong Kong herausgefunden. Mit Hilfe der funktionalen Magnetresonanztomografie untersuchte es sechzehn chinesische Kindern, von denen acht Legastheniker waren. Bei Letzteren zeigte sich eine ungewöhnlich geringe Aktivität im linken *Gyrus frontalis medialis* (der mittleren Windung im linken Stirnlappen). Diese Gehirnregion trägt entscheidend dazu bei, grafische Symbole komplexen, bedeutungstragenden Lautfolgen (Morphemen) zuzuordnen. In der chinesischen Schrift ist das wichtig, weil es viele tausend Bildzeichen gibt, die jeweils für ein ganzes Wort stehen.

In unserer lateinischen Schrift mit ihrem relativ kleinen Alphabet müssen dagegen zunächst nur Buchstaben erkannt und bedeutungsleeren Einzellauten (Phonemen) zugeordnet werden. Das geschieht primär in der linken temporo-parietalen Hirnrinde (dem Grenzbereich zwischen Scheitel- und Schläfenlappen). Bei Europäern mit Leseschwäche ist deshalb hauptsächlich diese Region betroffen. Die chinesischen Legastheniker zeigten hier dagegen keine Auffälligkeit.

(Nature, 2.9.2004, S. 71)


HEINZ MILLER, ALFRED-WEGENER-INSTITUT

◀ Piniennadel aus dem grönländischen Eisbohrkern

KLIMA

Piniennadel im arktischen Eis

Bei Pinien denkt man an mediterrane Gefilde und kaum an die Arktis. Entsprechend groß war die Überraschung der Forscher, als sie in einem Bohrkern vom unteren Rand des drei Kilometer dicken Eispanzers in Nordgrönland außer Rindenstückchen auch eine Piniennadel entdeckten. Nach Ansicht des Geophysikers Heinz Miller vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven könnte sie aus der Zeit vor der Vereisung der Insel stammen. Damals, vor ungefähr 2,5 Millionen Jahren, muss es auf Grönland erheblich wärmer gewesen sein als heute. Eine tiefgefrorene unversehrte Originalnadel aus jener fernen Vergangenheit – womöglich mit intaktem Erbmaterial – wäre ein Glücksfall für die Biologen. Allerdings könnte das Fundstück auch aus einer jüngeren Zwischeneiszeit stammen, räumt Miller ein. Klarheit soll eine genaue Datierung bringen.

Der Eisbohrkern selbst ist nur etwa 123 000 Jahre alt. Er gehört zu den letzten, die im Rahmen des Nordgrönland-Eiskern-Projekts seit 1996 gewonnen wurden. Insgesamt dokumentiert die Serie von Eisproben die Klimageschichte Grönlands und der Nordhalbkugel bis zurück in die letzte Warmzeit. Demnach war das Klima damals ähnlich stabil wie heute. »Und die letzte Eiszeit setzte vor rund 115 000 Jahren sanft ein, längst nicht so abrupt wie in ›The Day after Tomorrow‹ «, sagt Miller.

(Nature, 9.9.2004, S. 147)

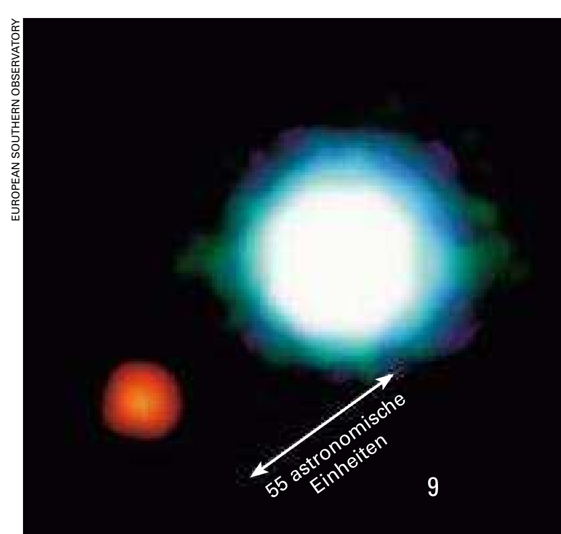
ASTRONOMIE

Erstes Foto eines fremden Planeten

Astronomen der Europäischen Südsternwarte (Eso) ist es möglicherweise erstmals gelungen, einen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems direkt zu beobachten. Bereits im April dieses Jahres hatten sie mit dem Teleskop Yepun auf dem Cerro Paranal in Chile einen schwachen, roten Lichtfleck in der Nähe des Objekts 2M1207 entdeckt. Letzteres ist ein »Brauner Zwerg«: ein sternähnliches Gebilde, das jedoch nicht genug Masse hat, um Kernfusionsreaktionen in seinem Inneren zu zünden und deshalb nur durch Kontraktion Energie erzeugt. 2M1207 liegt rund 230 Lichtjahre von der Erde entfernt im Sternbild Wasserschlange.

Um zu erkennen, was sich hinter dem roten Lichtfleck verbirgt, nahmen die Eso-Forscher sein Spektrum auf, wofür sie bis an die Grenzen des technisch Möglichen gehen mussten. Doch die Anstrengung zahlte sich aus. Das Spektrum erwies sich als typisch für einen jungen, noch rund tausend Grad heißen Planeten mit etwa der fünffachen Masse von Jupiter. Für diese Deutung spricht insbesondere auch die Entdeckung von Wassermolekülen. Die Astronomen berechneten, dass der mutmaßliche Planet etwa doppelt so weit von dem Braunen Zwerg entfernt ist wie Neptun von der Sonne. Ob er allerdings tatsächlich um 2M1207 kreist, müssen künftige Beobachtungen erweisen. *(ESO, 10.9.2004)*

▼ **Der rote Fleck neben 2M1207 ist vermutlich ein extrasolarer Planet.**



EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY



INSTITUT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN

◄ Eine dunkle Schicht im Natursteinwerk Hägnach bei Pfrondorf zeugt von einer riesigen Flutwelle. Sie entstand, als vor 200 Millionen Jahren ein großer Meteorit ins Meer stürzte.

GEOLOGIE

Massentod durch Riesenwelle

An der Wende vom Trias- zum Jura-Zeitalter vor etwa 200 Millionen Jahren verschwanden schlagartig drei Viertel aller Lebewesen von der Erde. Der Tübinger Geologe Michael Montenari glaubt jetzt im Natursteinwerk Hägnach bei Pfrondorf die Ursache dafür gefunden zu haben.

Im Profil des Steinbruchs schließt sich an Ablagerungen aus der Trias eine zwanzig bis dreißig Zentimeter mächtige Jura-Schicht an, die aus schwarzen Kalken besteht und nach einer besonders häufig darin vorkommenden Ammonitenart Psilonotenbank genannt wird. Mit ihrem chaotischen Durcheinander von Sand, Schlamm und organischem Material muss sie bei hoher Strömungsenergie in einem flachen Meer entstanden sein. Ganz ähnliche Schichten, deren Ursprung bislang rätselhaft war, gibt es in Nordirland und Südwestengland, wo sie jedoch bis zu 2,5 Meter mächtig sind.

Montenari erklärt sie als Hinterlassenschaft einer riesigen Flutwelle, die das von ihr aufgewühlte Material vor sich hergetrieben und im Flachwasser abgelagert hat. Ein Indiz dafür ist unter anderem, dass die Muschelschalen alle mit der Wölbung nach oben zeigen. Heutige Tsunamis werden meist von Seebeben verursacht und haben Höhen bis sechzig Meter. Die Welle am Ende der Trias muss gut hundert Meter hoch gewesen sein, um die beobachteten Ablagerungen zu erzeugen. Nur ein Seebeben der Stärke 20 könnte einen so gewaltigen Tsunami ausgelöst haben: »Doch auf der Erde gibt es die physikalischen Gegebenheiten dafür nicht«, erklärt Montenari. Deshalb bleibe nur ein Meteoriteneinschlag ins Meer als Ursache.

(Universität Tübingen, 13.9.2004)

MEDIZIN

Unterkiefer wuchs im Rücken

In den Genuss der ersten festen Mahlzeit seit neun Jahren ist jüngst ein 56-Jähriger gekommen. Wegen eines Mundhöhlenkarzinoms war ihm der größte Teil des Unterkiefers entfernt worden, weshalb er sich nur noch von Brei und Suppe ernähren konnte. Dass er jetzt wieder kauen kann, verdankt er einer neuartigen Prothese, die ein Forscherteam der Universität Kiel in seinem Rücken herangezüchtet hat.

Per Computertomografie wurde eine 3-D-Aufnahme vom Schädel des Patienten gemacht und am Rechner ein virtueller Unterkieferknochen geschaffen. Nach dessen Vorlage fertigten die Forscher einen Maschenkäfig aus Titan und füllten ihn mit einem Kalziumphosphat-Mineral, einem natürlichen Knochenwuchsstoff (BMP7) und Blut aus dem Knochenmark. Anschließend pflanzten sie ihn dem Mann in einen Rückenmuskel unterhalb der rechten Schulter ein.

Sieben Wochen später holten die Mediziner den Titankäfig mit dem inzwischen nachgewachsenen Kieferknochen wieder heraus und implantierten ihn in den Schädel. Laut Patrick Warnke, dem Leiter der Forschergruppe, passt der so herangezüchtete Kiefer perfekt, während sich herkömmliche Implantate, die aus Bein- oder Hüftknochen modelliert werden, meist nur grob in die gewünschte Form bringen lassen. Die Forscher hoffen, in einem Jahr den Titankäfig entfernen zu können. Auch über die Implantation von Zähnen in den neuen Kiefer denken sie bereits nach. *(The Lancet, 28.8.2004, S. 766)*

▼ Am Computer wurde ein virtueller Kiefer (links) für den Schädel des Patienten (rechts) entworfen.

THE LANCET



HIRNFORSCHUNG

Warum Rache süß ist

Wer kennt sie nicht aus Kindheitstagen: die irre Freude, wenn es den Bösewichten im Märchen am Ende selbst an den Kragen geht? Die Lust an der Rache gehört offenbar zur menschlichen Natur. Das haben Ernst Fehr und Dominic de Quervain von der Universität Zürich nun auch wissenschaftlich bewiesen. Wie sie mit der Positronenemissionstomografie (Pet) zeigen konnten, wird immer dann, wenn Menschen unfaires Verhalten bestrafen dürfen, in ihrem Gehirn der als Belohnungszentrum bekannte Schweifkern *(Nucleus caudatus)* aktiviert. Das geschieht auch, wenn sich die Versuchsperson mit der Rache selbst schadet, was sie eigentlich betrüben müsste.

Die evolutionsbiologische Begründung dafür hatten schon frühere Verhaltensexperimente geliefert: Nur das Damoklesschwert der Vergeltung kann in größeren Gemeinschaften das empfindliche Pflänzchen »Gemeinsinn« davor bewahren, unter dem rücksichtslosen Zugriff einzelner Egoisten zu verkümmern. *(Science, 27.8.2004)*



Mitarbeit: Oliver Koch und Stephanie Hügler

Gesamtansicht

Saurons Auge

Diese Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops riss selbst nüchterne Nasa-Forscher zu poetischen Vergleichen hin: Unergründlich wie das Auge Saurons, des körperlosen Magiers in Tolkiens »Herr der Ringe«, sei das erstmals derart detailreich abgebildete Objekt. Astronomen kennen es als Katzenaugennebel. Wie alle Planetarischen Nebel entstand das Gebilde, als ein ausgebrannter Stern beim Kollaps unter der eigenen Schwerkraft in mehreren Schüben seine Hülle abstieß. Die nacheinander weggeschleuderten Schichten, die jeweils so viel Masse enthalten wie alle Planeten des Sonnensystems, erscheinen als konzentrisches Muster aus mindestens elf »Zwiebelschalen«. Diese haben einen erstaunlich konstanten Abstand, der einem Zeitraum von 1500 Jahren entspricht. Bisher war nicht bekannt, dass sterbende Sterne sich ihrer Hülle in so regelmäßigen Intervallen entledigen. Über den Grund spekulieren die Astronomen noch. Vor tausend Jahren änderte sich die Aktivität dann drastisch. Nun entstand innerhalb der ein halbes Lichtjahr breiten Zwiebelschalenstruktur ein äußerst komplexes Gespinst aus Gasströmen (Jets) und blasenförmigen Stoßfronten. Es hat sich seit 1994 erkennbar vergrößert. Was die dramatische Zunahme der Aktivität auslöste, ist noch rätselhaft.

ESA, NASA, HEIC UND DAS HUBBLE HERITAGETEAM (STSCI / AURA)

QUANTENPHYSIK

Hohe Schule der Teilchendressur

Die Verschränkung von Photonen und anderen Partikeln – der Schlüssel für künftige Quantencomputer – macht rasche Fortschritte. Jetzt gelang das Kunststück mit fünf Lichtteilchen. Derweil teleportierten Wiener Forscher Photonen unter der Donau hindurch.

Von Georg Wolschin

Die janusköpfige Natur des Lichts hat die Physiker lange verwirrt: Bei manchen Experimenten verhält es sich als Welle, bei anderen dagegen wie ein Teilchen. Dieser Widerspruch ließ sich erst im Rahmen der Quantenmechanik auflösen. Demnach ist ein Photon eben beides: Teilchen und Welle. Vom Experiment hängt es ab, welches Wesensmerkmal zu Tage tritt. Gleiches gilt für alle Teilchen – auch solche mit Ruhemasse.

Die Wellennatur des Lichts offenbart sich bei Interferenzerscheinungen. Fällt ein einfarbiger Strahl durch zwei schmale, eng benachbarte Spalte, bildet er diese auf dem Schirm dahinter nicht etwa ab. Vielmehr entsteht eine Serie aus parallelen Streifen, deren Intensität von innen nach außen abnimmt. Ein solches Interferenzmuster kann nur auftreten, wenn das Licht als Welle beide Spalte gleichzeitig passiert. Interessanterweise bleibt das Streifenmuster auch bestehen, wenn die Lichtquelle so schwach ist, dass sich nur noch ein einziges Photon in der Messapparatur befindet. Dieses interferiert dann einfach – wie Paul Dirac es 1958 bereits lakonisch formulierte – »mit sich selbst«.

Doch was geschieht, wenn man die Photonen nicht einzeln durch die Apparatur schickt, sondern als miteinander »verschränkte« Paare, deren quantenmechanische Zustände sich, wie Physiker sagen, kohärent überlagern? Eine solche Verschränkung hat inzwischen einige Berühmtheit erlangt, weil sie die Voraussetzung für ein Kunststück bildet, das an Sciencefiction-Visionen gemahnt: die augenblickliche Übertragung der Eigenschaften eines Teilchens auf ein anderes. In populären Medien wird diese Teleportation gern anschaulich mit dem »Beamen« verglichen, durch das sich die Mannschaft des Raumschiffs Enterprise bei Bedarf momentan an einen anderen Ort versetzen ließ.

Worin äußert sich die Verschränkung? Bildlich gesprochen, entsteht ein unsichtbares Band zwischen den betroffenen Partikeln, das ihre Eigenschaften aufeinander abstimmt, auch wenn sie räumlich getrennt sind. Misst man also etwa die Polarisation des einen Teilchens, so ist im selben Moment die des anderen festgelegt – ohne dass zwischen beiden Information ausgetauscht werden müsste (was eine endliche Zeitdauer erfordern würde, weil es höchstens mit Lichtgeschwindigkeit geschehen könnte).

Einstein mochte sich mit diesem paradoxen Faktum nicht abfinden und sprach von »spukhafter Fernwirkung«. Er hielt es für ausgeschlossen, dass die Messung an einem der Teilchen den Zustand des anderen beeinflusst. Mit Kollegen ersann er ein hypothetisches Experiment, das die Absurdität einer solchen Wechselwirkung illustrieren sollte. Inzwischen wurde genau dieser Versuch aber durchgeführt. Statt Einsteins Überzeugung zu beweisen, widerlegte er sie.

Beamen unter der Donau hindurch

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die 600 Meter weite Teleportation von Photonen durch ein Glasfaserkabel unterhalb der Donau in Wien ist hier durch das »Beamen« eines Menschen veranschaulicht. Zunächst wurden das zu teleportierende Objekt – in Wahrheit nur ein Lichtquant – und ein verschränktes Paar erzeugt (links unten), von dem sich der eine Partner durch ein Glasfaserkabel auf die andere Donauseite bewegte (rechts unten). Dann erfolgte eine gemeinsame Messung des verbliebenen Partners und des zu teleportierenden Objekts (links oben). Nach dem Funken des Messergebnisses ans andere Ufer konnte dort schließlich das ursprüngliche Objekt rekonstruiert werden (rechts oben).

Verschränkt im Doppelspalt

Doch zurück zum Doppelspalt-Experiment mit zwei verschränkten Photonen. Schon im Jahr 2000 leiteten Jonathan P. Dowling vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) und seine Kollegen theoretisch ab, dass dabei ein Interferenzmuster entstehen sollte, in dem der Abstand zwischen den hellen Streifen halbiert ist. Generell gilt: Die Distanz der Interferenzlinien nimmt umgekehrt proportional zur Anzahl der verschränkten Photonen ab. Bei drei Lichtquanten beträgt sie also ein Drittel und bei vieren ein Viertel des ursprünglichen Werts.

Die quantenmechisch gekoppelten Photonen verhalten sich in dieser Situation also wie Atome, die zu einem Molekül verbunden wurden. Auch dessen Materiewellenlänge ist kleiner als die der Ausgangsteilchen. Doch besteht ein gro-

ßer Unterschied: Die verschränkten Photonen sind – anders als die chemisch verknüpften Atome – in keiner Weise aneinander gebunden.

Schon 2001 konnte ein Team um Milena D'Angelo an der Universität von Maryland in Baltimore die Vorhersage von Dowling und seinen Kollegen für Paare aus verschränkten Photonen experimentell bestätigen. Versuche mit mehr als zwei Lichtquanten gelangen dagegen zunächst nicht. Die Schwierigkeit war vor allem, Gruppen aus mehreren verschränkten Photonen in den benötigten Mengen zu erzeugen. Das schafften erst kürzlich fast gleichzeitig ein Team in Toronto mit drei und eines in Wien mit vier Lichtquanten. Beide berichteten im Mai dieses Jahres über ihren Erfolg.

Schon zwei Monate später folgte die nächste Rekordmeldung: Eine Gruppe um Jian-Wei Pan an der Universität Heidelberg konnte erstmals fünf Photonen quantenmechanisch miteinander koppeln. In all diesen Fällen entsprach der Abstand der Streifen im Interferenzmuster der theoretischen Vorhersage: Je nach Anzahl der verschränkten Lichtquanten betrug er ein Drittel bis ein Fünftel des Werts für ein einzelnes Photon.

Eine mögliche praktische Anwendung dieser Versuche liegt in der Fotolithografie, der Standardmethode zur Herstellung von Computerchips. Die weitere Miniaturisierung der Schaltkreise droht derzeit daran zu scheitern, dass sich fotolithografisch keine Strukturen erzeugen lassen, die wesentlich kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung sind. Interferenzmuster von verschränkten Photonen könnten hier einen Ausweg bieten.

Dabei ist der Effekt umso ausgeprägter, je mehr Photonen miteinander verkoppelt werden. Das gilt auch für eine andere mögliche Anwendung von verschränkten Teilchen: den Quantencomputer. Dessen Architektur ist bereits im Ansatz parallel. Die Rechenschritte zur Lösung einer Aufgabe werden alle gleichzeitig ausgeführt – und nicht wie bei heutigen Computern nacheinander. Das erhöht die Geschwindigkeit ganz erheblich, setzt aber voraus, dass sehr viele Photonen verschränkt werden. Die Ergebnisse der Gruppen in Toronto, Wien und Heidelberg sind ein erster, wichtiger Schritt auf diesem Weg.

Die Abwasserkanäle von Wien, Hauptschauplatz des Films »Der dritte Mann«, dienten Forschern jetzt zur Teleportation von Photonen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Rückt der Verwirklichung langsam näher: der Teleportationshafen, in dem die Reisenden kein Flugzeug mehr besteigen müssen, sondern augenblicklich an ihr Ziel versetzt werden.

Fernkopieren mit offenem Ziel

Das gilt auch für eine Variante der Teleportation, die das Heidelberger Team entwickelt hat. Dabei wird der unbekannte Zustand eines Lichtquants auf ein System aus drei verschränkten Photonen übertragen. Er lässt sich später wahlweise bei jedem davon realisieren (und gleichzeitig ermitteln), indem man eine bestimmte Messung an den beiden anderen durchführt. Pan und seine Kollegen sprechen deshalb von Teleportation mit offenem Ziel *(open-destination teleportation)*: Man kann nachträglich frei entscheiden, welches Photon die ursprüngliche Information tragen soll. Ein derartiges Verfahren könnte sich bei Quantencomputern, aber auch bei der Quantenkommunikation zwischen mehreren Parteien als sehr nützlich erweisen.

Wichtig für praktische Anwendungen der Verschränkung ist auch, dass sie sich über große Entfernungen aufrechterhalten lässt. Einen spektakulären Beweis dafür lieferten jetzt Anton Zeilinger und seine Kollegen an der Universität Wien: Sie realisierten eine Teleportation unter der Donau hindurch. Dazu verlegten sie in einem Abwasserkanal unter dem Fluss ein 800 Meter langes Glasfaserkabel und schickten jeweils eines von zwei verschränkten Photonen hindurch auf die andere Seite.

Innerhalb von 28 Stunden schafften sie mehr als 4000 erfolgreiche Teleportationen, obwohl das Glasfaserkabel Temperaturschwankungen und anderen Störfaktoren ausgesetzt war *(Nature, 19. 8. 2004)*. Damit bewiesen sie, dass das Verfahren nicht nur unter Idealbedingungen im abgeschirmten Labor, sondern auch in der relativ rauen Außenwelt über beachtliche Distanzen funktioniert. Die Forscher sehen darin den ersten Schritt zu einer Quantenkommunikation zwischen weit entfernten Teilnehmern, die sich in einer fernen Zukunft vielleicht auf die ganze Welt ausweiten lässt. ◁

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

MEDIZIN

Achillesferse des Tuberkulose-Erregers

Wie gelingt es Tuberkelbazillen, sich in Immunzellen zu verstecken? Mit der Antwort auf diese Frage haben Schweizer Forscher zugleich eine viel versprechende neue Bekämpfungsstrategie gefunden.

Von Felix Straumann

Mit jährlich zwei Millionen Opfern weltweit gehört die Tuberkulose immer noch zu den verheerendsten Infektionskrankheiten. Nachdem die Zahl der Todesfälle über lange Zeit abgenommen hatte, ist die Tendenz seit gut einem Jahrzehnt wieder steigend. Die Weltgesundheitsorganisation nennt dafür zwei Gründe: die Verbreitung des HI-Virus, die vor allem den Ländern Afrikas zusetzt, und das vermehrte Auftreten multiresistenter Tuberkulose-Stämme – ein sich verschärfendes Problem im ehemaligen Ostblock.

Der Tuberkulose-Erreger *Mycobacterium tuberculosis* ist ein Meister des Versteckspiels, der es schafft, lange Zeit unbehelligt in Zellen des Immunsystems zu überleben. Das macht seine Bekämpfung besonders schwierig. So trägt weltweit rund jeder Dritte das Bakterium in sich, ohne es zu merken. Nach der Infektion können Wochen, Monate oder Jahre vergehen, bis die Krankheit ausbricht. In über neunzig Prozent der Fälle kommt es sogar nie dazu.

Was ist der Grund dafür? Wie jeder Fremdkörper wird auch *M. tuberculosis* nach dem Eindringen in den Körper von speziellen Komponenten des Immunsystems verschlungen: den Makrophagen oder Fresszellen. Diese enthalten Bläschen, die mit einem Mix aus Radikalen – aggressiven Molekülbruchstücken – und Enzymen gefüllt sind. Normalerweise werden eingefangene Mikroorganismen auf dem schnellsten Weg zu diesen so genannten Lysosomen befördert und dort zerstört. Das Mycobakterium verhindert den Transport zu den Bläschen jedoch und bleibt dadurch ungeschoren.

Wie ihm dies gelingt, war lange ein Rätsel. Doch nun scheinen Forscher um Jean Pieters von der Universität Basel die Lösung gefunden zu haben. Das Beste daran: Aus ihren Erkenntnissen ergibt sich zugleich eine viel versprechende neue Bekämpfungsmethode *(Science, 18. 6. 2004, S. 1800)*.

Ein verdächtiges Enzym

Ursprünglich ging es den Basler Forschern gar nicht um die Tuberkulose. Sie wollten nur die Transportprozesse in den Makrophagen genauer untersuchen. Doch dabei stießen sie auf eine unerwartete Querverbindung zu den Mykobakterien. Sie stellten nämlich fest, dass bestimmte Enzyme – so genannte Proteinkinasen – an dem Transport beteiligt sind. Enzyme derselben Art finden sich aber auch in *M. tuberculosis*, wie der Blick auf das 1998 entzifferte Genom der Mikrobe zeigt.

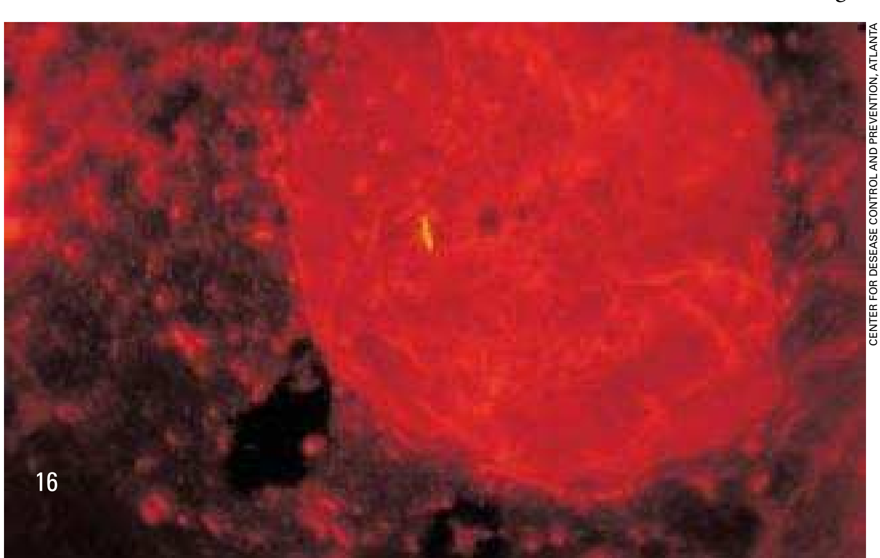
Das ist verwunderlich; denn Proteinkinasen haben bei Bakterien im Allgemeinen keine wichtige Funktion, während sie in Zellen höherer Organismen vielerlei Vorgänge regulieren. Trotzdem enthält *M. tuberculosis* gleich elf verschiedene Typen davon. Das brachte Pieters und seine Mitarbeiter auf die Idee, dass die Tuberkulose-Bakterien die Enzyme dazu nutzen könnten, ihren Transport zu den tödlichen Lysosomen zu verhindern.

In ersten Experimenten unterdrückten die Schweizer Wissenschaftler deshalb auf gut Glück die Aktivität aller Proteinkinasen in Makrophagen, die mit Mykobakterien infiziert waren. Und siehe da: Plötzlich wurden die Tuberkulose-Erreger in den Fresszellen zerstört.

Die nächste Frage war nun, welches der elf bakteriellen Enzyme die entscheidende Rolle spielt. Der Kreis der Verdächtigen ließ sich schnell auf zwei eingrenzen, da nur sie in freier Form vorliegen, während die anderen neun fest in der Bakterienmembran verankert sind und deshalb wohl keine externen Vorgänge beeinflussen können.

Weitere Indizien rückten schließlich die Proteinkinase G ins Fadenkreuz der Forscher. So hat sie die größte Ähnlichkeit zu einer Säugetier-Kinase, die am Transport von Mikroben zu den Lysosomen beteiligt ist. Zudem findet sie sich auch im Erreger der Lepra *(Mycobacterium leprae)* sowie beim Impfstamm *Mycobacterium bovis* BCG, die beide in Makrophagen überleben, nicht dagegen im harmlosen *Mycobacterium smegmatis*.

Um den endgültigen Beweis zu erbringen, entfernten die Forscher das Gen mit dem Bauplan für die Proteinkinase G – aus technischen Gründen allerdings nicht in *M. tuberculosis* selbst, sondern in der zum Impfen verwendeten Variante *M. bovis* BCG. Das so manipulierte Bakterium unterschied sich nicht erkennbar vom Wildtyp und gedieh außerhalb von Makrophagen völlig normal. In den Fresszellen hingegen wurde es umgehend zum Lysosom transportiert und zerstört. Die Basler Forscher machten auch die Gegenprobe: Sie pflanzten das Gen für die Proteinkinase G in das nicht pathogene *M. smegmatis* ein, das daraufhin in Makrophagen überlebte.



CENTER FOR DESEASE CONTROL AND PREVENTION, ATLANTA

Im Auswurf von Tuberkulose-Patienten erscheinen die Erreger nach Anfärben im UV-Licht als gelbe Stäbchen (links).

In einem weiteren Versuch schließlich zeigte die Gruppe um Pieters, dass die Tuberkulose-Erreger Proteinkinase G aktiv in die Fresszellen ausscheiden. Damit gewannen ihre Resultate auch praktische Bedeutung; denn sie machten deutlich, dass das Enzym ein ausgezeichnetes Ziel für die Bekämpfung des Erregers abgeben sollte. Mykobakterien haben eine fast undurchlässige Zellwand, weshalb Medikamente kaum in sie eindringen können. Dagegen ist die ausgeschiedene Proteinkinase für Hemmstoffe leicht zugänglich.

Bekämpfung auch im Ruhezustand

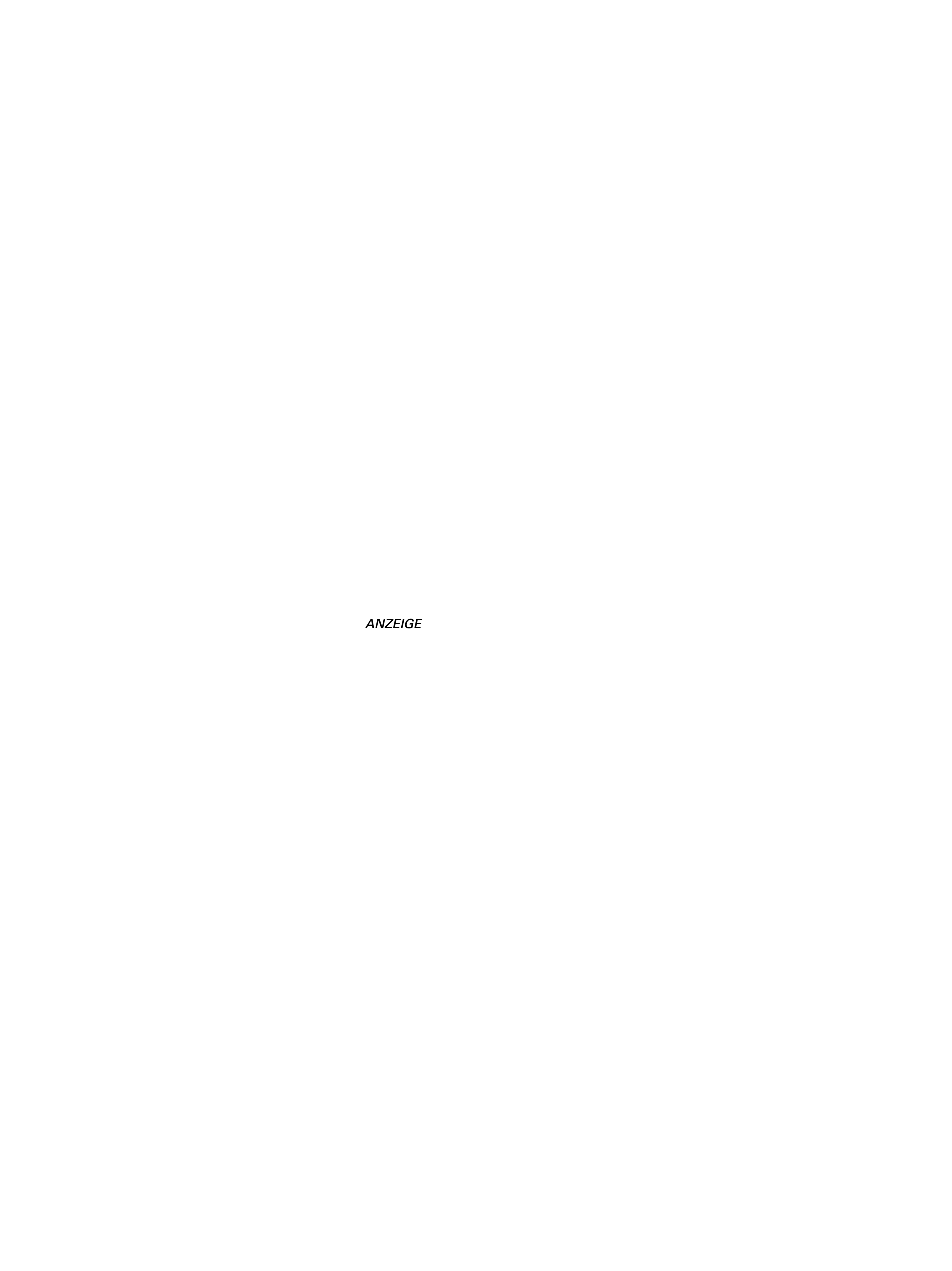
Mit dem neuen Ansatz sollte sich auch ein anderes Problem der Tuberkulose-Bekämpfung quasi von selbst lösen. Weil die Bakterien in den Makrophagen und anderen Wirtszellen lange Zeit in einem Ruhezustand verharren und sich nicht vermehren, verpufft die Wirkung der meisten Antibiotika, die nur das Wachstum der Krankheitserreger stören. Ohne die Proteinkinase kann *M. tuberculosis* dagegen nicht überleben. Die Blockade dieses Enzyms trifft daher auch ruhende Bakterien. Das Team von Pieters arbeitet bereits an der Entwicklung eines Inhibitors und hat sich zu diesem Zweck mit einer auf Kinase-Hemmer spezialisierten Biotechnologie-Firma zusammengetan.

Ob sich der neu entdeckte Schwachpunkt der Mykobakterien in eine wirksame Tuberkulose-Therapie umsetzen lässt, bleibt freilich abzuwarten. Nur kurze Zeit nach der Basler Publikation berichteten Wissenschaftler um Yossef Av-Gay an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada), dass die Entfernung des Gens für Proteinkinase G in dem Tuberkulose-Erreger den Ausbruch der Erkrankung bei Mäusen nur hinausschiebt, nicht jedoch verhindert *(Molecular Microbiology, Bd. 52, S. 1691)*. Den Basler Forschern war dies entgangen, weil sie die Entwicklung der Infektion nicht so lange verfolgten. Da ihr Interesse primär den molekularen Transportmechanismen innerhalb der Makrophagen galt, beschränkten sie sich auf die ersten Stunden.

Und es gibt weitere Fragezeichen. So ist noch keineswegs sicher, ob die Proteinkinase G tatsächlich mit der Wirtszelle interagiert oder nur eine wichtige Aufgabe im Stoffwechsel des Erregers erfüllt. Zwar scheint ihr Fehlen die Vitalität der Bakterien außerhalb der Makrophagen nicht zu beeinträchtigen. Dennoch könnte es den Stoffwechsel in einer Weise modifizieren, dass die Mikroben die Fähigkeit verlieren, in den Fresszellen zu überleben. Die Experimente von Pieters liefern zwar deutliche Indizien für eine direkte Interaktion mit den Makrophagen, aber keinen unumstößlichen Beweis. Andererseits berichtet Av-Gay in seiner Veröffentlichung über Hinweise, wonach die Proteinkinase G dafür sorgt, dass das Bakterium bei Nahrungsmangel seinen Stoffwechsel umstellt.

Schließlich erweist sich als Manko, dass die Basler Forscher ihre Experimente nicht mit dem eigentlichen Tuberkulose-Erreger, sondern mit dem Impfstamm durchgeführt haben. Es bleibt deshalb ungewiss, ob sich ihre Resultate übertragen lassen. Dennoch zeigt sich das Team von Pieters optimistisch und arbeitet – ebenso wie andere Forschergruppen weltweit – mit Feuereifer daran, die noch offenen Fragen zu klären. ◁

Felix Straumann ist Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Zürich.


ANZEIGE

Was vom Tage übrigblieb

Klimaaufklärung à la Hollywood? Der Erfolg ist zwiespältig.

»The Day after Tomorrow«, Roland Emmerichs drastischer Ökothriller um eine plötzliche Klimakatastrophe, zeitigt paradoxe Wirkungen. Eine Befragung durch Fritz Reusswig, Soziologe am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, ergab: Deutsche Kinobesucher waren nach dem Filmerlebnis etwas weniger sicher als vorher, ob der Klimawandel überhaupt real sei.

Ganz anders eine Studie im Auftrag der amerikanischen National Science Foundation: In den USA verstärkte der Sciencefiction-Schocker bei den meisten Zuschauern die Besorgnis über einen Klimawandel deutlich; nur ein Prozent bezeichnete sich nachher als weniger besorgt. Ein signifikanter Prozentsatz gab unter dem Eindruck des Films sogar an, nun lieber den demokratischen Präsidentschaftskandidaten John Kerry wählen zu wollen; denn der kritisiert Präsident Bush unter anderem wegen seiner Laisser-faire-Haltung zu Umweltproblemen *(Nature, 2. 9. 2004, S. 4)*.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Eiszeit durch Klimaerwärmung? Diese Botschaft verwirrte viele Kinobesucher.

Erklären können sich Forscher die transatlantische Diskrepanz nur durch das generell höhere Umweltbewusstsein der Europäer: Wer von der Realität des Treibhauseffekts und der drohenden Destabilisierung des Klimas durch menschliche Einflüsse ohnedies schon überzeugt ist, der kann durch die krassen Übertreibungen eines Hollywood-Katastrophenfilms höchstens skeptischer werden. Wer hingegen bisher der amerikanischen Regierung geglaubt hat, für Maßnahmen gegen den Treibhauseffekt bestehe kein Anlass, dem gibt Emmerichs Kassenknüller offenbar zu denken.

So weit, so gut. Getrübt wird das einigermaßen positive Bild – der Film tat als Warnung mit dem Holzhammer immerhin seine Wirkung – freilich durch eine weitere Untersuchung, mit viel Aufwand durchgeführt von Zoologen und Ornithologen aus Cambridge (England) und Kapstadt (Südafrika). Demnach steigerte der Film zwar bei den meisten befragten Engländern die Besorgnis über drohende Folgen des Klimawandels ganz erheblich. Aber zugleich waren Besucher des Films nachher weniger in der Lage als die vorher Interviewten, die tatsächlich zu erwartenden Effekte realistisch einzuschätzen. Mit anderen Worten: »The Day after Tomorrow« schockiert – und er desinformiert *(Science, 17. 9. 2004, S. 1713)*.

Damit ist die anlässlich dieses Streifens lebhaft debattierte Frage, ob die publikumswirksame Übertreibung eines echten Problems aufklärend zu wirken vermag, nun mit einem klaren »Jein« zu beantworten: Ja, die extreme Zuspitzung eines hochkomplexen Systemverhaltens bringt Menschen, die bisher gar nichts darüber wussten, wenigstens ins Bewusstsein, dass ein Problem vorliegt. Und nein, ein auf möglichst viele gruselnde Zuschauer spekulierender Sensationsfilm macht nicht klüger, sondern dümmer.

An der geduldigen Aufklärung durch populärwissenschaftliche Artikel führt eben kein Weg vorbei. Für seine Mühe wird der Leser mit dem Erlebnis belohnt, etwas verstanden zu haben. Dann ist er sogar fähig, sich über einen Film, in dem es in New York aussieht wie in einer Tiefkühltruhe, gelassen zu amüsieren.

Michael Springer

Der Autor ist ständiger freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

KOSMOLOGIE

Dunkle Energie im Labor

Eine geheimnisvolle Kraft treibt das Universum auseinander. Aufschluss über ihre Ursachen versprechen sich zwei Wissenschaftler nun von einem recht einfachen irdischen Experiment.

Von Gerhard Samulat

Eigentlich müsste es den Astronomen hochnotpeinlich sein: Um die beobachtete Dynamik der Galaxien und des Universums beschreiben zu können, postulieren sie so dubiose Phänomene wie die Dunkle Energie und die Dunkle Materie. Dabei bedeutet der Begriff »dunkel« nicht nur, dass sich diese Medien bislang der direkten Beobachtung entziehen – er enthält auch das Eingeständnis, dass die Forscher noch keinen blassen Schimmer davon haben, um was es sich dabei überhaupt handelt (Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 28).

Das ist umso pikanter, als die Dunkle Energie, welche die Expansion des Alls beschleunigt, nach jüngsten Schätzungen mit 73 Prozent den Löwenanteil des Universums ausmachen soll. Immerhin noch 23 Prozent des Alls bestehen demnach aus der ebenso ominösen Dunklen Materie, deren Gravitation aber zumindest, wie gewohnt, anziehend ist. Nur vier Prozent des Kosmos sollen sich aus herkömmlicher Materie mit den uns bekannten Teilchen wie Protonen, Neutronen und Elektronen zusammensetzen.

Hinter der Dunklen Materie vermuten Astrophysiker bisher unbekannte Partikel. Dagegen bringen sie die Dunkle Energie mit den Quantenfluktuationen im Vakuum in Verbindung. Aus Heisenbergs berühmter Unschärferelation folgt nämlich, dass selbst im absoluten Nichts spontan virtuelle Teilchen entstehen, die innerhalb kürzester Zeit wieder verschwinden und eine Art negativen Druck erzeugen.

Alle Versuche, die Dunkle Energie aus der Quantentheorie zu berechnen, sind bisher jedoch kläglich gescheitert: Die Theoretiker verfehlten den aus astronomischen Beobachtungen gewonnenen Wert um mindestens 55 Zehnerpotenzen – das ist eine Eins mit 55 Nullen (Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42)! Auch experimentelle Ansätze brachten nicht den gewünschten Erfolg.

Dabei hatte der niederländische Physiker Hendrik Casimir schon 1948 einen Vorschlag zur Messung der Vakuumenergie gemacht: Zwei parallele Platten in einem absoluten Vakuum sollten einander anziehen, weil sich im Zwischenraum weniger quantenmechanische Zustände ausbilden können als außerhalb. 1997 gelang Steven Lamoreaux vom Los Alamos National Laboratory der experimentelle Nachweis dieses Effekts. Da die Messgenauigkeit allerdings extrem stark davon abhängt, dass die Platten exakt parallel stehen, ersetzte der Forscher eine der Flächen durch eine Kugelschale. Mit dieser Anordnung konnte er tatsächlich eine winzige anziehende Kraft von gut hundert Nanonewton ermitteln.

Dennoch taugen diese Experimente letztlich nicht zur verlässlichen Bestimmung der Vakuumenergie. Ein Problem ist, dass es keine idealen Oberflächen gibt. Stets hat man es mit einem Gitter aus Atomen zu tun, das Fehlstellen enthält. Zugleich vollführen die Teilchen thermische Bewegungen, welche die Messergebnisse überlagern. Außerdem gelingt es nicht, die Positionen der Platten genau genug zu bestimmen.

Deshalb haben Christian Beck von der Queen-Mary-Universität in London und Michael Mackey von der McGill-Universität in Montreal nun eine Alternative ersonnen, die noch dazu keinen besonders großen Aufwand erfordert. Sie schlagen vor, die Stärke der Quantenfluktuationen mit einem so genannten Josephson-Kontakt zu messen.

In diesem Schaltelement tunneln Cooper-Paare – quantenmechanisch gekoppelte Elektronen – durch eine hauch-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

In einem Josephson-Kontakt fließt durch eine Isolierschicht zwischen zwei Supraleitern ein Tunnelstrom. Seine Abhängigkeit von der angelegten Spannung bei sehr tiefen Temperaturen könnte zur Messung von Quantenfluktuationen und damit der Energie des Vakuums dienen. Für den Stromtransport im Supraleiter sorgen Paare aus quantenmechanisch gekoppelten Elektronen.

Virtuelle Teilchen, die kurz auftauchen und wieder verschwinden, verleihen dem Vakuum eine Energie. Diese könnte im kosmischen Maßstab als Kraft wirken, welche die Expansion des Universums beschleunigt.

dünne, isolierende Schicht von einem Supraleiter zu einem anderen. Dadurch fließt ein Strom, dem ein Rauschen überlagert ist. Dieses wird bei extrem tiefen Temperaturen von den Nullpunktschwingungen – einer speziellen Art von Quantenfluktuationen – dominiert, während thermische Effekte praktisch keine Rolle mehr spielen.

Um die prinzipielle Eignung der Methode zu überprüfen, griffen Beck und Mackey auf eine Messreihe zurück, die Roger Koch und seine Mitarbeiter am Lawrence-Berkeley-Laboratorium in Kalifornien schon 1982 aufgenommen hatten. Es handelte sich um das Frequenzspektrum der Stromfluktuationen von Josephson-Kontakten, die auf wenige Millikelvin heruntergekühlt worden waren. Indem Beck und Mackey daraus ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▷ die Energiedichte der Nullpunktschwingungen ableiteten, kamen sie für die Dunkle Energie auf einen Wert von 0,062 Gigaelektronenvolt pro Kubikmeter. Das liegt immerhin nur um einen Faktor von etwa fünfzig neben den astronomisch ermittelten 3,9 Gigaelektronenvolt pro Kubikmeter.

Nun hatten die Forscher auch keinen Volltreffer erwartet. Das Experiment, dessen Ergebnisse sie benutzten, war schließlich für einen anderen Zweck konzipiert und die Messapparatur nicht auf die Beantwortung der jetzt gestellten Frage zugeschnitten. Der Test bestärkte die Forscher jedoch in der Annahme, dass man mit moderneren Josephson-Kontakten in die richtige Größenordnung gelangen sollte und so den Zusammenhang von Vakuumfluktuation und Dunkler Energie bestätigen könnte. Das gliche einer Sensation.

Aber selbst wenn es anders käme und das Ergebnis einer genauen Messung immer noch weit von dem astronomisch bestimmten Wert entfernt läge, hätte das Experiment einen Sinn. Dann müssten sich die Astronomen nämlich fragen, ob die Dunkle Energie entgegen der allgemeinen Überzeugung vielleicht doch nicht in der Quantenfluktuation des Vakuums wurzelt. Und die Theoretiker dürften sich weiterhin die Köpfe über die Ursache dieser merkwürdigen Kraft zerbrechen, die das Universum immer schneller auseinander treibt. ◁

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

GLOSSE

Flaschenpost aus dem All

Liebe Leser, haben Sie auch schon einmal ein Päckchen vor Ihrer Haustür entdeckt, dessen Absender Sie nicht sofort zuordnen konnten? Dann sehen Sie künftig bitte etwas genauer hin; denn die Sendung könnte von Außerirdischen stammen. Extragalaktische Intelligenzen würden nämlich – so die brandneue Erkenntnis von Christopher Rose von der Rutgers-Universität in Piscataway (New Jersey) und dem Ingenieur Gregory Wright – lange Nachrichten vermutlich eher in materieller Form verschicken als sie zu funken *(Nature, 2.9.2004, S. 47)*.

Der Grund: Die Flaschenpost benötigt weniger Energie als elektromagnetische Signale, zumindest wenn sie hundert Terabits und mehr an Information enthält. Und da Außerirdische rationell denken, dürften sie die sparsamere Variante wählen: einfach schnell ein Paket schnüren und es vom intergalaktischen UPS-Service zustellen lassen.



Deshalb war es nach Ansicht der beiden Forscher auch kurzsichtig, bei der Fahndung nach Botschaften ferner Zivilisationen bisher nur mit riesigen Antennen den Himmel abzuhorchen. Lieber sollte man einmal im Hinterhof unseres Planeten nachsehen; denn dort könnte ein kosmischer Nachbar seine Nachricht hinterlegt haben. Umlaufbahnen um den Jupiter, den Mond, oder gar die Erde würden sich gut als Briefkästen für E.T. und Konsorten eignen.

Eine intergalaktische Sendung könnte aber durchaus auch versehentlich vor Ihrer Haustür landen. Wenn man bedenkt, was bei der hiesigen Post so alles schief läuft, ist zu befürchten, dass auch der außerirdische Paketservice hin und wieder die vorgesehene Umlaufbahn verfehlt.

Und damit fängt der Ärger an. Zunächst einmal müssen wir hoffen, dass ein Außerirdischer in seinem Drang, uns über sein Weltwissen zu informieren, es geschafft hat, seine gesammelten Erkenntnisse vorher zu digitalisieren. Denn hundert Terabit entsprechen etwa der fünffachen Menge aller Bücher in der US-amerikanischen Library of Congress. Nicht auszudenken, wenn uns diese Datenmenge in Schriftform auf den Kopf plumpsen würde! Nicht nur Ihr Vorgarten wäre verwüstet ...

Als Nächstes scheint es fraglich, dass die All-Dokumente in einer für uns verständlichen Sprache verfasst sind. Wenn unsere Vettern im Kosmos wirklich intelligent sind, werden ihre Computer kaum mit Microsoft-Betriebssystemen ausgestattet sein. Auch ist es eher unwahrscheinlich, dass Volkshochschulkurse in Englisch auf fernen Planeten zum Alltag gehören.

Und dann – wer wäre überhaupt befugt, solche Schriftstücke zu lesen? Präsident Bush? Der Papst? Oder Erich von Däniken? Wem sollte man das Fundstück also anvertrauen? Der Polizei? Ethnologen, die ja Experten in der Erforschung fremder Kulturen sind? Oder doch lieber der Nasa?

Last but not least gebietet es die Höflichkeit, einen solch weit gereisten Brief auch zu beantworten. Laut Nature-Redakteur Marc Peplow müssen wir jedoch damit rechnen, dass beispielsweise ein Päckchen von einem tausend Lichtjahre entfernten Stern bei einer Geschwindigkeit von einer Million Kilometer pro Stunde etwa eine Million Jahre unterwegs war. Die freundlichen Absender hätten ihre Nachricht also losgeschickt, als unsere Altvorderen gerade erst von den Bäumen geklettert waren. Selbst wenn unsere neu gewonnenen Brieffreunde mit einer längeren Lebenszeit gesegnet wären als wir und extraterrestrische Zivilisationen nicht so schnell untergingen wie hiesige, hätte die Menschheit vermutlich schon lange das Zeitliche gesegnet, bevor eine erneute Antwort einträfe.

Sie sehen also: Ein interplanetarisches Paket würde nur Probleme machen. Tun Sie uns also einen Gefallen. Wenn Sie ein solches Päckchen vor der Haustür finden, schicken Sie es am besten ungeöffnet an den Absender zurück ...

Stephanie Hügler

Die Autorin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Flugsaurier

Warmblütige Pioniere der Lüfte



Lagunenszene aus der Kreidezeit des heutigen Nordost-Brasiliens: Rechts vorn zieht ein *Tapejara* im vollen Flug dicht über das Wasser. Wahrscheinlich fischten so viele Flugsaurier. Vorn links watscheln zwei *Anhanguera,* deren Flügelspanne vier Meter betrug. Hinten schreckt ein *Irritator* – ein Dinosaurier – zwei *Thalassodromeus*-Flugsaurier auf.

ALAIN BÉNÉTAUT

Wie die Dinosaurier zu Lande herrschten einst geflügelte Echsen in der Luft. Manche von ihnen besaßen Flügelspannweiten wie kleinere Passagierflugzeuge.

Von Eric Buffetaut

Eher als die Vögel und die Säugetiere erfanden die Reptilien das Fliegen. Die ersten Flugsaurier erschienen bereits früh im Erdmittelalter, vor 220 000 Millionen Jahren. Als die letzten von ihnen vor rund 65 Millionen Jahren – am Ende der Kreidezeit – gleichzeitig mit den Dinosauriern ausstarben, hatte die Gruppe Arten mit bis zu zwölf Meter Flügelspannweite hervorgebracht. Neue Fossilfunde und Untersuchungsmethoden klären allmählich, wie diese über eine lange Zeitspanne erfolgreichen Tiere lebten.

Die erste bekannt gewordene Versteinerung eines Flugsauriers stammte aus den Solnhofener Kalksteinbrüchen von Eichstätt in Bayern (siehe Bild S. 31). Soweit sich heute rekonstruieren lässt, erwarb der pfälzische Kurfürst Karl Theodor (1724–1799) die Rarität für sein neues Mannheimer Naturalienkabinett, dessen Leitung er dem Naturforscher Cosimo Alessandro Collini (1727–1806) übertrug. Collini beschrieb 1784 ein merkwürdiges versteinertes Skelett mit einem Riesenkopf und einem auffallend langen Hals, das er keiner damals bekannten Tiergruppe zuzuordnen vermochte. Besonders fielen ihm an den Vorderextremitäten die extrem langen vierten Finger auf, die einer Hand mit ansonsten mehreren krallenbewehrten kürzeren Fingern entsprangen. Collini vermutete, dass dieses Tier seine Vordergliedmaßen zusammenfalten konnte und dass daran eine auslappende Haut befestigt war. Nach seinem Urteil handelte es sich aber weder um einen Vogel noch um eine Fledermaus. So erklärte er die Kreatur schließlich zu einem Meerestier.

Erst 1801 erkannte der französische Forscher Georges Cuvier (1769–1832), Begründer der Paläontologie und vergleichenden Anatomie, dass die Versteine- ▷

▷ rung von einem unbekannten Reptil mit Flügeln stammte. Seiner Ansicht nach spannte sich zwischen dem verlängerten vierten Finger – dem »Flugfinger« – und dem Körper eine Flughaut, die bis zu den Hinterbeinen reichte. Cuvier gab dem Tier 1809 den wissenschaftlichen Namen *Pterodactylus* (»Flügelfinger«).

Seither konnten Wissenschaftler eine Anzahl weiterer Fossilien von Flugsauriern, wissenschaftlich Pterosauriern, untersuchen. Reichlich hundert Arten sind heute bekannt, die kleinsten kaum größer als Spatzen, viele aber mit einer Flügelspanne von mehreren, die größten bis zu einem Dutzend Metern. Oft war der Körper im Verhältnis zu den Flügeln ziemlich klein. Der häufig bizarr gestaltete Kopf erscheint hingegen meist recht groß. Etliche der Fossilien zeigen noch anatomische Feinstrukturen von Knochen oder Haut, und sogar die Form und Struktur der Flügel. Reste des Mageninhalts wie auch Kiefer und Zähne lassen auf die Ernährungsweise dieser Luftakrobaten schließen. Kürzlich entdeckten Forscher in China erstmals ein Ei mitsamt schlupfbereitem Embryo (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 13).

IN KÜRZE

▶ Fast während des gesamten Erdmittelalters beherrschten Reptilien den Luftraum. Die **Flugsaurier** oder **Pterodactyla** (»Flügelfinger«) waren nicht nur die ersten, sondern auch die größten Wirbeltiere, die aus eigener Kraft fliegen konnten. Sie dürften warmblütig gewesen sein. Am Boden liefen sie auf allen vieren.

▶ Die frühen, kleineren Flugsaurier aus Trias und Jura – die **Rhamphorhynchoidea** – nutzten zum Steuern in der Luft noch einen langen Schwanz. Die späteren Formen – die **Pterodactyloidea** –, die ab dem Jura auftraten und die ursprünglichere Gruppe schließlich ablösten, besaßen einen ganz kurzen Schwanz. Vermutlich waren diese zuletzt riesengroßen Arten perfekte Segler.

▶ Als am Ende der Kreidezeit die **Dinosaurier** ausstarben, verschwanden auch die letzten Flugsaurier. Nach ihnen übernahmen die **Vögel**, die seit dem Jura erschienen, die Herrschaft in den Lüften.

Aus all dem verstehen wir nun immer besser, wie sich diese großen Reptilien in der Luft und auf dem Land verhielten. So steht mittlerweile fest, dass die Pterosaurier nicht einfach nur im Aufwind segelten oder sich von Höhen im Gleitflug herabsinken ließen, sondern beim Fliegen auch kräftig mit den Flügeln schlagen konnten und sich aus eigener Kraft in die Höhe zu schwingen vermochten. Sie besaßen die dazu nötige kräftige Muskulatur und den erforderlichen hohen Stoffwechsel. Folglich müssen sie warmblütig gewesen sein, was Paläontologen inzwischen auch aus anderen anatomischen Befunden schließen.

Nur noch bei zwei anderen Wirbeltiergruppen entstand, jeweils unabhängig, ein aktiver Flug: bei den Vögeln und bei den Fledermäusen. In allen drei Gruppen gestalteten sich dazu die Vorderextremitäten um, wenn auch in verschiedener Weise. Die Vögel nutzen als Tragfläche Federn. Ihre Vorfahren waren kleine, flugunfähige Dinosaurier, deren Federkleid sie wahrscheinlich einfach warm hielt. Erst später dürften die feinen Hautanhänge zum Fliegen »umfunktioniert« worden sein (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 32). Die Flügel der Fledermäuse und Flughunde ähneln äußerlich denen der Flugsaurier schon eher. Auch deren Tragfläche bildet eine Haut. Allerdings spannt sie sich anders. Im vorderen Bereich wirken dabei vier stark verlängerte Finger mit.

Die ältesten bekannten Flugsaurier lebten bereits vor 220 Millionen Jahren in der oberen Trias, also im frühen Erdmittelalter. Trotz mancher urtümlicher Merkmale trugen diese Arten bereits gut entwickelte Flügel, die in den Grundzügen schon gebaut waren wie bei späteren Pterosauriern. Noch rätseln die Paläontologen, von welchen Reptilien diese ersten Flugkünstler abstammten. Manche Forscher stellen sie in die nähere Verwandtschaft der Dinosaurier. Das würde bedeu-

▼ **Während des Erdmittelalters – von der Trias bis zur Kreide – wurden die Flugsaurier immer größer. Anfänglich besaßen die Arten einen langen Schwanz. Im Jura begannen Formen mit kurzem Schwanz die ursprünglichere Gruppe abzulösen.**

AUS: P. WELLNHOFER: GROSSE ENZYKLOPÄDIE DER FLUGSAURIER / POUR LA SCIENCE / SIBYLLE FRANZ / SDW

ten, dass sich die Flugsaurier von relativ hoch entwickelten Reptilien abspalteten. Andere Forscher glauben eher, dass die Pterosaurier von ursprünglicheren Reptilien abzweigten.

Die weitere Evolution der Gruppe können die Wissenschaftler inzwischen umso besser nachzeichnen. Aus den beiden auf die Trias folgenden Perioden des Erdmittelalters – Jura und Kreide, die vor rund 200 beziehungsweise 140 Millionen Jahren einsetzten – bargen Paläontologen unzählige Fossilien dieser fliegenden Echsen. Der Grundbauplan der Flugsaurier hat sich während der über 150 Millionen Jahre bis zu ihrem Aussterben nur in den Details verändert, obwohl zunehmend Riesentiere auftraten. Allerdings besaßen die ursprünglichen Arten in der Regel noch einen recht langen Schwanz mit einigen dutzend Wirbeln und einer segelartigen Spitze, der bei den späteren Formen verschwand – was sicherlich die Flugweise mit bestimmte. Deswegen untergliedern Systematiker diese Reptilien in »Langschwanz-« und »Kurzschwanz-Flugsaurier« (wissenschaftlich Rhamphorhynchoidea und Pterodactyloidea).



Leichtgewichtige Riesen-Flugkünstler

Pterosaurier mit stark verkürztem Schwanz entwickelten sich vor 150 Millionen Jahren, im oberen Jura, aus einem Zweig der älteren Gruppe. Die Langschwanzarten trugen noch sämtlich Zähne, die Kurzschwanzarten oft nicht mehr. Letztere lösten die langschwänzigen Formen am Anfang der Kreide vollständig ab. Am Ende des Saurierzeitalters lebten ausschließlich noch einige riesenhafte kurzschwänzige Arten.

Schon dank ihres im Verhältnis zum Körpervolumen geringen Gewichts waren die Pterosaurier hervorragend an das Fliegen angepasst. Offenbar wogen selbst die größten Arten, deren Flügelspannweite über zehn Meter betrug, nur einige dutzend Kilogramm. Sie besaßen extrem leicht gebaute, weit gehend hohle Knochen. Die Langknochen der Gliedmaßen beispielsweise bildeten lange Röhren mit noch dünneren Wänden als bei Vögeln. Damit das Skelett trotz der zarten Bauweise die mechanischen Belastungen beim Fliegen gut aushielt, sorgten Verstrebungen in den Hohlknochen für Stabilität. Vielleicht half zugleich einströmende angewärmte Atemluft das Gewicht zu mindern. Denn charakteristische Öffnungen in den Wänden der Röhrenknochen, ähnlich wie bei den Vögeln, könnten besagen, dass die Knochen Luftsäcke mit Verbindung zu den Lungen enthielten.

Die Riesen unter den Flugsauriern besaßen zudem besonders leicht konstruierte Schädel. Der gigantische *Hatzegopteryx* vom Ende der Kreidezeit beispielsweise, den Kollegen und ich erst kürzlich in Rumänien entdeckten, konnte seine Flügel zwölf Meter weit ausbreiten, wog aber schätzungsweise nur etwa hundert Kilogramm. Dessen Schädel wirkt auf den ersten Blick so robust, dass wir zunächst an einen Dinosaurier glaubten. Doch die innere Struktur dieser Knochen erinnert an einen Schwamm oder besser noch an Styropor, das bei aller Leichtigkeit eine hohe Festigkeit aufweist: Die insgesamt sehr dünnen äußeren Wände bestanden aus unzähligen papierdünnen Knochenlamellen, die wiederum winzige Hohlräume bildeten (siehe Bild S. 29).

Hatzegopteryx

ALAIN BÉNÉTEAU

Dass viele Einzelheiten über die Flugechsen des Erdmittelalters erst in letzter Zeit zu Tage treten, liegt unter anderem an der besonders zarten Struktur ihrer Skelette. Meist blieben von den dünnwandigen Hohlknochen, wenn überhaupt, nur winzige Trümmer erhalten. Komplette Skelette konnten allenfalls unter günstigsten Umständen fossilisieren – wenn sich in völlig ruhigem Wasser sehr feines Sediment darauf ablagerte. Die fränkischen Jurakalkschichten von Solnhofen und Eichstätt in Bayern bildeten sich unter solchen seltenen Voraussetzungen. Auch im Nordosten Chinas oder in Brasilien blieben Skelette, in dem Fall aus der Unterkreide, in Kalksedimenten am Rande ehemaliger Binnenseen und Flachmeere zurück. Mitunter haben sich sogar Abdrücke von Weichteilen erhalten, und man erkennt die Struktur der Haut und den Umriss der Flügel.

Bei manchen Exemplaren ist deutlich zu sehen, dass die Flughaut, wie bei den Fledermäusen, auch am Rumpf haftete und bis zu den Hinterbeinen reichte, ja diese teilweise noch miteinbezog. Bei den ursprünglicheren, langschwänzigen Formen erstreckte sich der Ansatz noch bis zu den Füßen, doch bei den moderneren Arten saß die Flughaut lediglich an den Oberschenkeln an. Das dürfte bedeuten, dass die ursprünglichere Gruppe die Hinterbeine noch nicht als Steuer einsetzte, also wohl auch kaum einen Segelflug beherrschte – was die modernere Gruppe vermutlich gut konnte.

Einige Fossilien zeigen sogar noch die innere Faserstruktur der Flügelmembran. Viele feine Stützfasern, die »Aktinofibrillen«, verlaufen in den Flügeln in etwa parallel zum »Flugfinger«, also dem verlängerten vierten Finger. Gerade in den letzten Jahren erkannten Wissenschaftler um Eberhard Frey vom Staatlichen Museum für Naturkunde Karlsruhe an Fossilien aus dem fränkischen Plattenkalk, dass die Flughaut aus mehreren Schichten bestand und dass eine dieser Schichten ein dichtes Netz feiner Blutgefäße durchzog (siehe Bild S. 28). Möglich erscheint, dass dieses Adernetz dazu da war, die beim Fliegen erzeugte Körperwärme abzuführen. ▷

▷ Schon ihr Körperbau beweist, dass die Pterosaurier aktive Flieger gewesen sein müssen. Die starke Muskulatur für den Kraftflug setzte am oberen Rumpf und an den Oberarmen an. Der kräftigste Muskel, um die Flügel gegen den Luftwiderstand nach unten zu drücken, inserierte am – wie bei den Vögeln gekielten – Brustbein. In den letzten Jahrzehnten ersannen Forscher verschiedene Modelle von Flugsauriern. Trotz einiger Erfolge bei Vorführungen überzeugten die Flugleistungen der meisten Konstruktionen nur mäßig, schon weil sich solche Modelle zu starr bewegen. Mit Sicherheit flogen die Pterosaurier wesentlich gewandter. Nie hätten sie sonst aus dem Flug heraus an der Wasseroberfläche Fische jagen oder allerlei kleine Lebewesen abfischen können. Dass sie solche Art der Nahrungsbeschaffung hervorragend beherrschten, schließen Paläontologen aus ihrer Kopfform – unter anderem den lang vorstehenden Kiefern –, ihrem Körperbau sowie Mageninhalten.

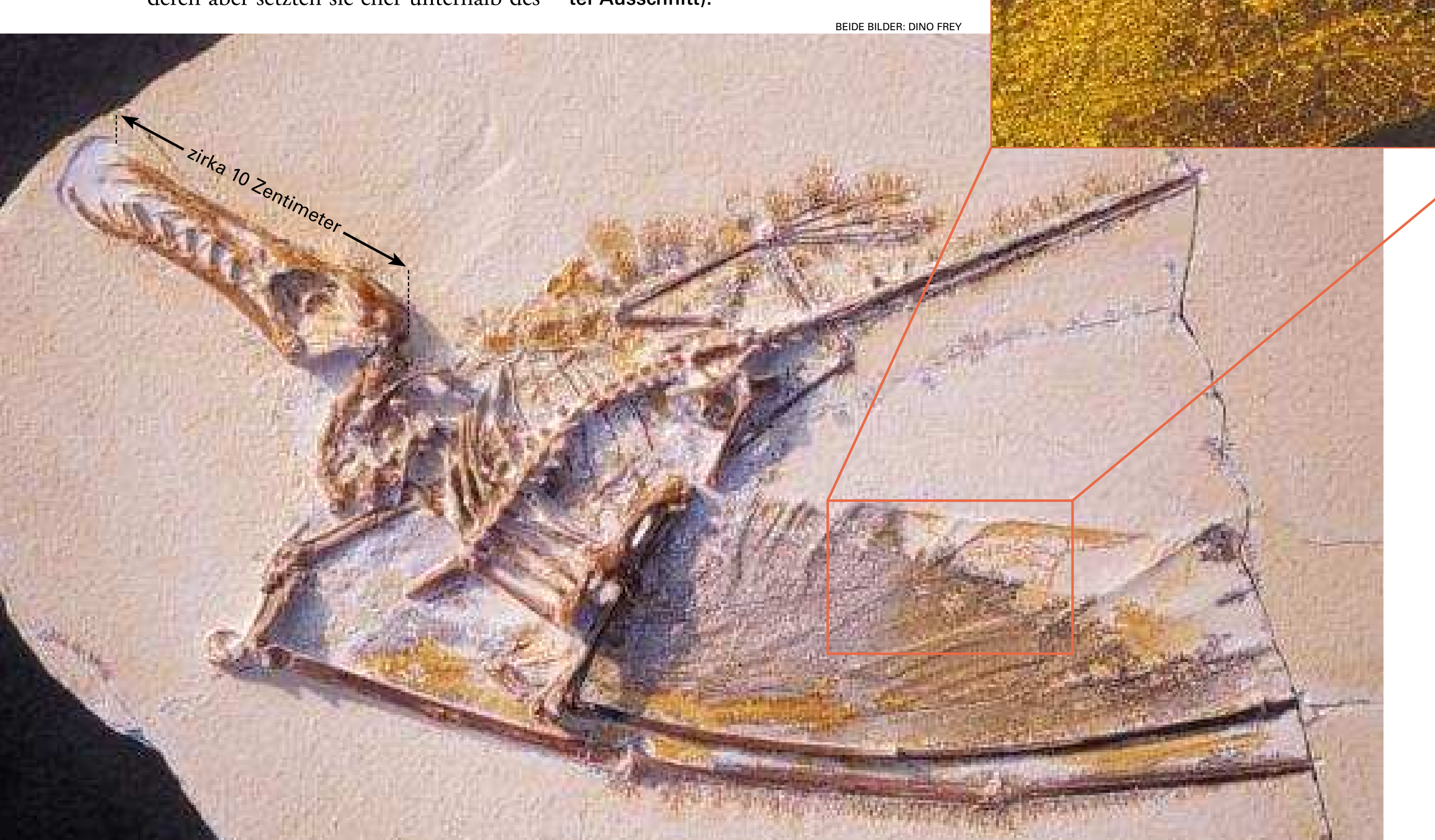
Trotzdem helfen die Flugmodelle verstehen, wie sich diese Reptilien in der Luft hielten. Beispielsweise vermutet die Forschergruppe um Frey, dass sich die Fluganatomie bei den riesigen Arten der Kreidezeit unterschied: Bei manchen saßen die Flügel, von der Seite im Flug gesehen, mehr oberhalb des Rumpfs, also ähnlich wie bei heutigen Vögeln. Bei anderen aber setzten sie eher unterhalb des Körpers an, was bei heutigen Vögeln und Fledermäusen nicht vorkommt. Der Unterschied dürfte sich auf die Flugweise ausgewirkt haben: Echsen mit bauchwärts ansetzenden Flügeln mussten in der Luft wahrscheinlich stets kräftig mit den Armen schlagen. Segeln konnten sie wohl kaum, was zum Rücken hin sitzende Tragflächen aber erlauben.

Bizarre Köpfe als Flugruder?

Eine andere höchst auffallende Struktur zahlreicher Flugsaurier, die womöglich unter anderem die Flugfertigkeit unterstützte, war ein von vorn betrachtet schmaler, oft sehr hoher und mitunter skurril geformter Knochenkamm auf dem Schädel. Bei manchen Arten stand dieser Aufsatz über der Stirn, bei anderen ragte er weit nach hinten über den Hals. Von der Seite wirken die Schädel vieler Flugsaurier, als hätten sie einen hohen Helm getragen. Bei manchen hatte der Kopfputz mehr die Form eines langen, breiten Messers.

Erst in den letzten Jahren entdeckte die Forschung hierzu Näheres – obwohl Paläontologen bereits im 19. Jahrhundert erkannt hatten, dass auf dem Schädel von *Pteranodon* ein langer, schmaler Kamm von der Form einer Messerklinge saß, der weit über den Kopf nach hinten abstand. Diese Tiere lebten in Nordamerika in der Oberkreide. Der größte bekannte Vertreter ihrer Gattung maß mit ausgebreiteten Flügeln neun Meter. Bei vielen eigentlich längst bekannten Arten entdeckten Forscher die Knochenkämme allerdings erst kürzlich.

Vor wenigen Jahren stellte sich heraus, dass es auch Kämme gab, die nicht knöchern waren, sondern aus Fasern bestanden – also einem Gewebe, das nur höchst selten fossil erhalten blieb. Selbst *Pterodactylus antiquus*, der eingangs erwähnte erste beschriebene Flugsaurier, trug auf dem Schopf einen solchen Kiel, wie Forscher kürzlich erstaunt entdeckten. Bisher zeigten Rekonstruktionen das Tier stets flachköpfig.



▼ **Sogar Feinstrukturen der Flughaut lässt dieses Fossil eines *Rhamphorhynchus* aus den Solnhofener Plattenkalken erkennen. Im UV-Licht wird ein Netz von Blutgefäßen inmitten von faserigem Stützgewebe sichtbar (vergrößerter Ausschnitt).**

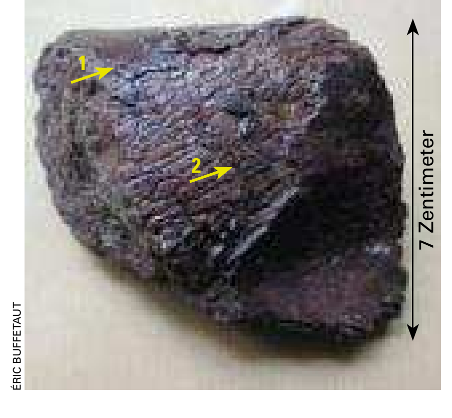
BEIDE BILDER: DINO FREY

Bis heute spekulieren die Paläontologen über den Zweck dieser oft bizarren Schädelstrukturen. Dass sie unter anderem eine aerodynamische Funktion hatten, scheint vielen Wissenschaftlern offensichtlich. Der Aufsatz könnte geholfen haben, den großen Kopf mit den weit vorragenden Kiefern auszubalancieren. Im Flug verhalf er vielleicht zu besserer seitlicher Stabilität.

Aber dienten die Knochenkämme wirklich vor allem der Flugakrobatik, oder hatten sie auch andere wichtige Funktionen? War das zum Beispiel auch eine Zierde, an der sich Artzugehörige erkannten oder mit der Männchen dem anderen Geschlecht imponierten? Wie mannigfaltig dieser Kopfputz aussah, hat sich erst im vergangenen Jahrzehnt herausgestellt. Dank einer Reihe spektakulärer neuer Fossilien wissen wir heute: Schmale »Helme« tauchten bei Flugsauriern bereits in der Trias auf. Im Jura wuchs ihre Vielfalt. Ein Beispiel gibt der erst vor einigen Jahren bei Le Havre entdeckte *Normannognathus*. Dieses fliegende Reptil trug einen Kamm, der von der Seite gesehen vermutlich lang und schmal weit über den Hals ragte.

In der Kreidezeit nahmen die Kämme schließlich immer bizarrere Formen an. Besonders eigenartig sah *Nyctosaurus* aus, eine Gattung aus der Oberkreide, die im Gebiet der heutigen USA lebte. Der Knochenkamm dieser Pterosaurier war wesentlich höher als der Schädel selbst und bestand aus mehreren langen Ästen, bildlich vorzustellen etwa wie ein Hirschgeweih. In Rekonstruktionen ist der Kopfaufbau meist wie ein von den Knochenästen gehaltenes Segel dargestellt. Da ihn nur manche von den *Nyctosaurus*-Fossilien aufweisen, vermutet S. Christopher Bennett, jetzt an der Fort Hays State University in Hays (Kansas), dass sich das skurrile Gebilde im Leben des Tiers erst später ausbildete. Vielleicht wuchs es sogar nur den Männchen, war also ein sekundäres Geschlechtsmerkmal. Bennett überlegt auch, ob der Auswuchs – ähnlich wie ein Hirschgeweih oder Antilopenhörner – vielleicht zur Arterkennung diente.

Bei einigen anderen Arten könnte der Knochenkamm aber tatsächlich in erster Linie als Kiel für die Flugstabilität gesorgt haben. Bei *Tapejara* aus der Unterkreide Brasiliens reichte das recht hohe Gebilde von der Spitze des Oberkiefers bis zum hinteren Schädelbereich.



Schädelfragment eines *Hatzegopteryx* aus Rumänien vom Ende der Kreidezeit: Unter einer feinen Außenwand (1) bilden hauchdünne Lamellen ein Hohlraumsystem (2). Dieser Knochen war zugleich leicht und stabil.

Vorn, am Kiefer, hielt eine Knochenspange den Aufsatz. Ansonsten bestand er aus Fasergewebe (siehe Bild S. 25).

Vermutlich verbesserten solche Kämme nicht nur den reinen Höhenflug, sondern erleichterten vielfach auch das Fischen. Dabei stießen die Reptilien wahrscheinlich dicht über die Wasseroberfläche hinab und tauchten nur die lang vorstehenden »Schnäbel« ein, recht ähnlich wie manche heutigen Wasservögel. Vermutlich erfüllten die verschiedenen Kiefer- und Gebissformen diesen Zweck hervorragend. Einige Flugsaurier trugen statt der Zähne sogar regelrechte Barten, mit denen sie Kleingetier abseihten. Viele Arten besaßen nämlich, bei einem ausladenden Unterkiefer, einen etwas nach oben gebogenen »Schnabel«.

Anpassungen gegen Wärmestau beim Fliegen

Eine weitere Funktion der Kopfaufsätze könnte das stark verzweigte Netz feiner Blutgefäße anzeigen, das sie durchzieht: Vielleicht gaben die Echsen über ihre großen Kämme – wie mutmaßlich auch über feine Adern in den Flügeln – Körperwärme ab, die sie beim Fliegen zwangsläufig erzeugten. Das postulieren Alexander Kellner vom Brasilianischen Nationalmuseum in Rio de Janeiro und Diogenes Campos von der Brasilianischen Bergbaubehörde bei *Thalassodromeus*, einer Gattung aus der Unterkreide, deren Fossilien in Brasilien geborgen wurden.

Diese Deutung leitet zu einer zentralen Frage über, die Paläontologen seit langem beschäftigt: Waren die Flugsaurier Warmblüter? Genauer gesagt: Konnten sie eine höhere Eigentemperatur aufrechterhalten als ihre Umgebung? Regulierten sie vielleicht sogar ihre Stoffwechseltemperatur selbst – was nicht das Gleiche ist?

Heutige Reptilien sind weit gehend von der Außenwärme abhängig. Bei kühlem Wetter bewegen sie sich nur träge. Doch mit kalten Muskeln hätte ein Flugsaurier wahrscheinlich erst gar nicht in die Luft steigen können. Überhaupt wäre der Stoffwechsel eines wechselwarmen Tiers zum Fliegen wohl zu langsam gewesen. Deswegen vermuten die Forscher seit fast einem Jahrhundert, dass die Flugsaurier eine gegenüber der Umgebung erhöhte Körperwärme erzeugten.

Diese These bestärken verschiedene Fossilfunde der letzten Jahrzehnte. Die erste aufschlussreiche Versteinerung stammt aus Kasachstan. Dort kamen in den 1970er Jahren in Sedimenten aus dem oberen Jura mehrere Exemplare eines kleinen Flugsauriers zu Tage, den der russische Paläontologe Alexander Scharov *Sordes pilosus* (»haariger Teufel«) nannte. Es sieht so aus, als ob das Tier einen Pelz trug, ein dichtes Kleid aus feinen Härchen. Später insbesondere in der Mandschurei gefundene Fossilien von Dinosauriern aus der Unterkreide bestätigen zumindest, dass im Erdmittelalter behaarte Reptilien lebten. Sollte *Sordes pilosus* tatsächlich in ein Fell gehüllt gewesen sein, dann erschiene plausibel, dass seine Haare bei kühlen Außentemperaturen körpereigene Wärme zurückhielten.

Untersuchungen zum Knochenwachstum der Flugsaurier sprechen gleichfalls für eine gegenüber der Außenwelt erhöhte Körpertemperatur. Wie insbesondere die Gruppe um Armand de Ricqlès von der Universität Paris VII an Knochenstrukturen feststellte, müssen junge Flugsaurier recht schnell herangewachsen sein und früh eine erwachsene Größe erreicht haben. Das erinnert an Vögel, die in jungem Alter ausgewachsen sind. So rasch können sich eigentlich nur Tiere mit einem hohen Stoffwechsel entwickeln.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Criorhynchus

Auch sonst gleichen sich Flugsaurier und Vögel in etlichen Merkmalen – obwohl Letztere einer anderen Reptilienlinie entstammen. Evolutionsbiologen erklären solche frappanten Parallelen durch den Anpassungszwang an eine ähnliche Lebensumwelt, in dem Fall also an das ▷

Eudimorphodon

▷ Fliegen. Verblüffenderweise scheint sich sogar das Gehirn beider Tiergruppen in ähnlicher Richtung weiterentwickelt zu haben, wie Schädelausgüsse von Pterosauriern annehmen lassen. Gehirnregionen für das Riechen etwa dürften bei ihnen, wie bei den Vögeln auch, eher klein ausgebildet gewesen sein. Dagegen war das Sehvermögen anscheinend besonders ausgeprägt. Auch Bereiche des Kleinhirns, die der Bewegungskoordination im Zusammenhang mit Seheindrücken dienen, wirken besonders prägnant.

Parallelen der Gehirnstrukturen vermuteten Paläontologen bereits im 19. Jahrhundert. Belege dazu lieferte die deutsche Forscherin Tilly Edinger (1897–1967) in den 1920er Jahren am Senckenberg-Museum in Frankfurt am Main. Kürzlich untersuchten Lawrence M. Witmer von der Ohio-Universität in Athens und Kollegen hoch aufgelöste computertomografische Aufnahmen solcher Fossilien. Wie sie feststellten, waren bei den Pterosauriern einige Strukturen, die unter anderem bei Vögeln mit dem Gleichgewichtssinn sowie mit der Koordination von visuellen Eindrücken und Bewegung im schnellen Flug zusammenhängen, sogar ausgeprägter ausgebildet als bei Vögeln. Dies betrifft sowohl die Bogengänge im Innenohr – also das Gleichgewichtsorgan – als auch bestimmte seitliche Strukturen des Kleinhirns, den so genannten Flocculus.

Die Beute stets fest im Blick

Bei Raubvögeln hilft die betreffende Kleinhirnregion die Bewegungen von Augen, Kopf, Hals und Flügeln beim Anflug auf Beute zu koordinieren. Da Pterosaurier wahrscheinlich fischten, indem sie dicht über der Wasseroberfläche flogen, mussten auch sie Blickfeld und Flugrichtung blitzschnell aufeinander abstimmen können. Sicherlich saßen in den Flügeln Sinnesorgane, die Rückmeldung über die Flügelhaltung gaben. Die Reptilien verloren folglich eine angepeilte Beute auch dann nicht aus dem Blick, wenn sie rasche Flugmanöver vollführen mussten.

Erst in den letzten Jahren gewannen die Forscher Gewissheit darüber, wie sich Flugsaurier auf dem Boden fortbewegten. Lange war strittig gewesen, ob sie zwei- oder vierbeinig liefen. Sie trugen vorn am äußersten Flügelgelenk zwar mehrere große Krallen – an den übrigen Fingern, die nicht die Flughaut spannten. Die benutzten sie wahrscheinlich zum Klettern. Doch war schwer vorstellbar, wie sie ihre Flügel, also quasi ihre umgestalteten Hände, beim Laufen auf flachem Grund hätten aufsetzen sollen.

Geraume Zeit vermuteten Paläontologen, dass die Flugsaurier ähnlich unbeholfen auf allen Vieren krabbelten wie heute Fledermäuse. In den 1980er Jahren entwickelten Kevin Padian von der Universität von Kalifornien in Berkeley und einige andere Paläontologen jedoch die These, die Flugechsen seien in etwa wie Vögel auf den Hinterbeinen stolziert. Die Forscher beriefen sich nicht nur auf verschiedene anatomische Details des Skeletts, sondern auch auf die von ihnen angenommene relativ nahe Verwandtschaft mit den Dinosauriern. Nach Meinung jener Wissenschaftler waren die Ahnen beider Reptilienlinien Zweibeiner gewesen. Und wie die ersten Dinosaurier sollten die frühen Flugechsen auf den Zehen der Hinterfüße gelaufen sein. Dazu hielten sie den Körper aufrecht. Ihre großen Flügel, die den Boden beim Gehen nicht berührten, legten sie dabei an – was anatomisch aber nur begrenzt möglich war, denn so gut wie Vögel konnten sie ihre Schwingen nicht zusammenfalten und am Körper halten.

Zunächst fand diese These einige Anerkennung. Inzwischen gilt sie aber auf Grund mehrerer Studien als widerlegt. Vor allem Peter Wellnhofer, der früher bei der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Historische Geologie an der Universität München arbeitete, entwarf ein anderes Modell. Demnach liefen die Flugsaurier am Boden auf ganz eigene Weise, weder den Vögeln noch den Fledermäusen vergleichbar.

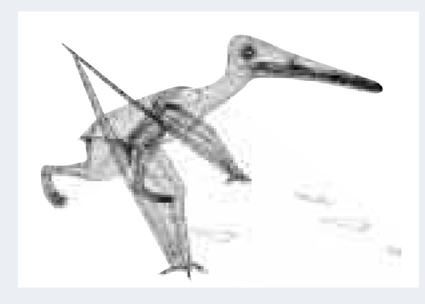
Nach den Analysen dieser Forscher hätten die Pterosaurier schon wegen der an den Hinterbeinen angewachsenen Flughaut, die dabei gestört hätte, schlecht aufrecht allein auf den Hinterbeinen gehen können. Auch vermochten sie die Beine, wie die Gelenke erkennen lassen, nicht so zu stellen, dass diese den Körper allein trugen. Wellnhofer ist darum überzeugt, dass die Flugsaurier beim Laufen am Boden unbedingt auch die Vorderextremitäten aufsetzen mussten.

Er vermutet, dass die Echsen dabei ihre großen Flügel halb anlegten, sodass der lange Flugfinger nach hinten oben

Flugsaurier auf dem Boden – eine Simulation

Beim Laufen auf dem Boden setzten Flugsaurier den ganzen Hinterfuß auf, wie der etwa fünf Zentimeter lange Abdruck beweist. Das Spurenfossil stammt von Crayssac in Südwestfrankreich und ist etwa 140 Millionen Jahre alt. Der Fundort lieferte auch etliche Fährten, die annehmen lassen, dass die Flugsaurier beim Gehen die Hände mitaufsetzten, wobei sie den langen vierten »Flugfinger« nach hinten oben abknickten.

Diese These testeten Pierre Roller und Jean-Michel Mazin am Modell eines Pterosauriers. Sie konnten bestätigen, dass die anatomischen Voraussetzungen einen Vierfüßergang erlaubten und dass dabei ebensolche Fußspuren entstanden wären.





JEAN-MICHEL MAZIN

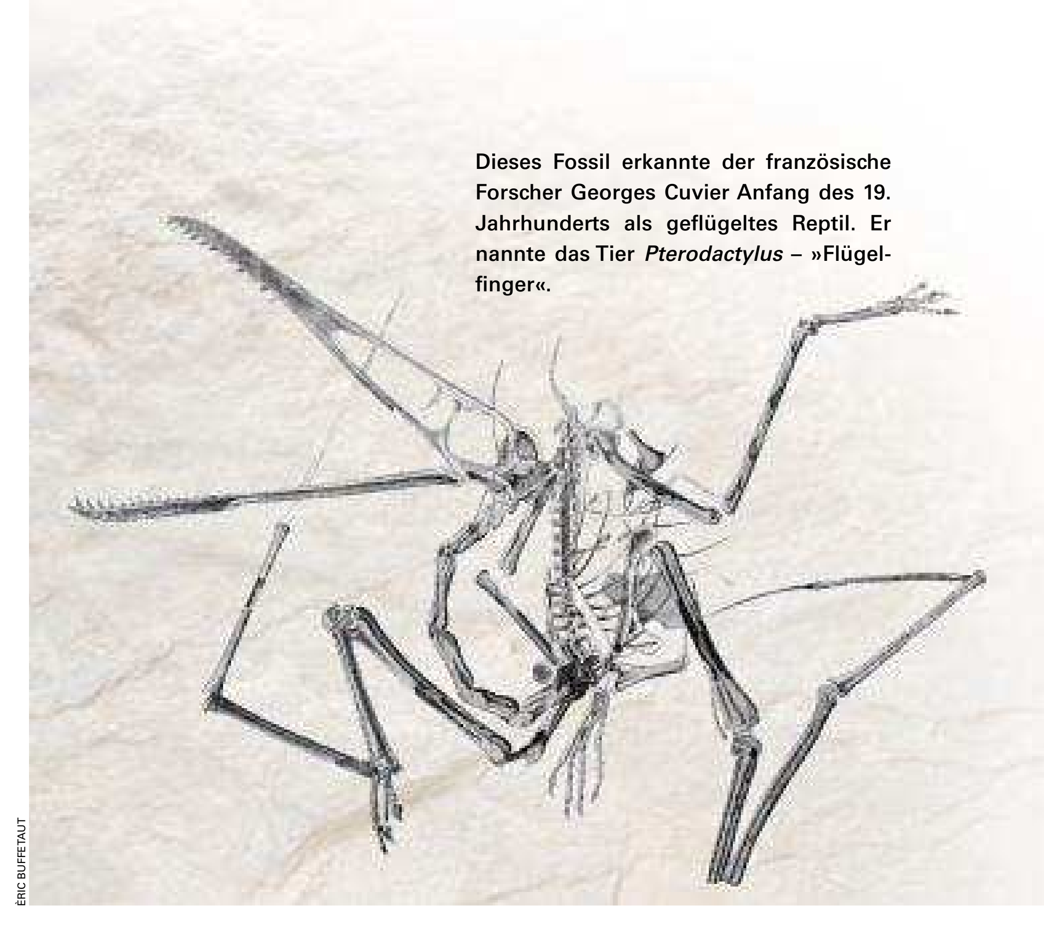


BEIDE BILDER: PIERRE ROLLER UND JEAN-MICHEL MAZIN

über den Rücken hinausragte. Belege für diese These lieferten letztlich so genannte Spurenfossilien, in dem Fall also Abdrücke von der Fortbewegung auf dem Boden.

Bereits 1957 beschrieb der Paläontologe William Stokes fossile Spuren in Jurageстein in Arizona, die er als Flugsaurierfährten deutete. Den unbekannten Tieren, die sie erzeugt hatten, gab er den wissenschaftlichen Namen *Pteraichnus*. Von seinen Kollegen erntete er zunächst Zweifel. Doch mittlerweile kennt die Paläontologie eine Anzahl von Fährten mit ähnlichem Muster, die sie heute zweifelsfrei Flugsauriern zuschreibt. Eine andere Tiergruppe kommt für die charakteristischen Abdrücke einfach nicht in Frage.

Zu den überzeugendsten Studien gehören die Untersuchungen eines Teams um Jean-Michel Mazin vom französischen Nationalen Forschungszentrum an der Universität Poitiers und Jean-Paul Billon-Bruyat von der Universität Lyon III. Bei Crayssac im Departement Lot in Südwestfrankreich legten die Wissenschaftler in Kalkgestein des Oberjuras einen versteinerten Strand mit zahlreichen Pterosaurierfährten frei.


ERIC BUFFETAUT

Dieses Fossil erkannte der französische Forscher Georges Cuvier Anfang des 19. Jahrhunderts als geflügeltes Reptil. Er nannte das Tier *Pterodactylus* – »Flügelfinger«.

Gewandt genug am Boden wie im Wasser

Die Flugechsen müssen auf recht eigenartige Weise gegangen oder gerannt sein. Auf jeden Fall setzten sie alle vier Gliedmaßen auf. Den Rumpf trugen sie dabei einigermaßen aufgerichtet – wie hoch, hing offenbar von der Geschwindigkeit ab. Als die Forscher diese Bewegungsweise am Computer mit Fossilmodellen simulierten, erhielten sie praktisch genau solche Fährten wie in den fossilen Ablagerungen (siehe Kasten links). Uns mag es ungeschickt erscheinen, sich auf diese Weise fortzubewegen. Doch anscheinend konnten die Flugsaurier ziemlich schnell laufen – und vielleicht sogar rasch genug rennen, um dann abzuheben. Denn wie diese Tiere losflogen, ist noch völlig unklar.

Die Spurenfossilien von Crayssac lassen auch erkennen, dass jene Flugsaurier zwischen den Zehen Schwimmhäute trugen. Aus den USA stammen fossile Spuren aus dem Jura, denen zufolge Pterosaurier im Flachwasser schwammen, also entweder Ruderbewegungen ausführten oder sich zumindest treiben ließen. Möglich erscheint darum, dass sie sich im nassen Element in der Hinsicht ähnlich wie manches Wassergeflügel verhielten.

Seit ihrer Entdeckung erweckten die fliegenden Saurier immer wieder Erstaunen. Der von Cuvier untersuchte *Pterodactylus*, ein Jurafossil, war ungefähr so groß wie eine Möwe. Einige Jahrzehnte danach, in den 1840er Jahren, beschrieb der britische Gelehrte James Bowerbank erstmals Riesenflugechsen aus oberkreidezeitlichen Schichten in England. Weitere dreißig Jahre später entdeckten Paläontologen der Vereinigten Staaten Fossilien des gewaltigen *Pteranodon*, dessen Flügelspanne etwa sieben Meter erreichte. Hundert Jahre lang blieb das der Größenrekord.

Aber 1975 vermeldeten Forscher die Entdeckung von *Quetzalcoatlus northropi*. Die Flügelweite dieses texanischen Giganten, der kurz vor dem Untergang der Riesensaurier gelebt hatte, schätzten sie auf über elf Meter. Seitdem häuften sich solche Funde. Wir kennen heute eine Reihe von Riesenflugechsen, die sämtlich am Ende der Kreidezeit lebten. Zu den größten Arten gehört derzeit *Hatzegopteryx thambema*, der kürzlich in Westrumänien ausgegraben wurde und mit seinen zwölf Metern Flügelweite offenbar noch größer als *Quetzalcoatlus* war. Allein seine Schädellänge betrug über zwei Meter.

Ähnlich riesige Pterosaurier lebten allerdings schon in der frühen Kreidezeit. Das beweisen neuere Funde aus Brasilien, Marokko, Frankreich und Großbritannien. Somit existierten gigantische Arten viele Millionen Jahre lang. Die Riesenflugsaurier bildeten demnach nicht von vornherein eine Sackgasse der Evolution. Sie waren keineswegs überdimensioniert, sondern vorzüglich an das Leben in der Luft und zu Lande angepasst. Die Gruppe behauptete sich bis zum Ende der Kreidezeit. Sie fiel – wie die Dinosaurier – offenbar erst dem großen Massensterben vor 65 Millionen Jahren, am Übergang von der Kreide zum Tertiär, zum Opfer. Nachfahren haben die Flugsaurier nicht hinterlassen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Eric Buffetaut ist Paläontologe und Direktor am französischen Nationalen Forschungszentrum (CNRS) in Paris. Er gehört zu den weltweit führenden Experten für Dinosaurier, Flugsaurier und Urzeitvögel.

Saurier und Urvögel. Spektrum der Wissenschaft, Digest 5, 3/1997

Die große Enzyklopädie der Flugsaurier. Von Peter Wellnhofer. Mosaik-Verlag, München 1993

Evolution and palaeobiology of pterosaurs. Von Eric Buffetaut und Jean-Michel Mazin (Hg.). Geological Society Special Publications, Bd. 217, London 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der Ursprung der Materie

Noch immer gibt es keine befriedigende Antwort auf die Frage, warum bei der Entstehung des Universums weit mehr Materie als Antimaterie entstand. Theoretiker suchen den Grund in subtilen Brechungen der Symmetrie zwischen fundamentalen Teilchen.

Von James M. Cline

Woher stammt der Stoff, aus dem die Welt besteht? Die philosophische Frage »Warum existiert überhaupt etwas und nicht vielmehr nichts?« galt lange als typisches Beispiel für spekulative Metaphysik. Doch seit fast einem halben Jahrhundert ist dies auch für Kosmologen und theoretische Physiker ein beunruhigendes Problem. Selbst die besten Theorien über den Ursprung des Universums liefern keine Erklärung, warum das Universum nicht leer ist.

Die Existenz der Materie ist ein schwacher Punkt der Urknalltheorie, die ansonsten so erfolgreich erklärt, was wir in der physikalischen Welt zu beobachten vermögen. In den ersten Augenblicken des Urknalls müsste es exakt so viel Materie wie Antimaterie gegeben haben. Aber da Materie und Antimaterie nicht nebeneinander existieren können, ohne sich sofort gegenseitig zu vernichten, wäre daraus ein langweiliges, leeres Universum hervorgegangen. Wie konnte die Materie also die Oberhand im Weltall gewinnen?

Als der russische Physiker und Dissident Andrej D. Sacharow 1967 darüber nachdachte, war er seiner Zeit weit voraus. Damals – ich lernte gerade das Einmaleins – nahm man die Entstehung der Materie als mehr oder minder gegeben hin. Erst Sacharow erkannte darin ein wichtiges Problem und beschrieb, welche Bedingungen für eine plausible Erklärung erfüllt sein müssen.

Die Substanz, aus der wir bestehen, setzt sich hauptsächlich aus Protonen und Neutronen zusammen, den Bestandteilen des Atomkerns. Physiker nennen diese Teilchen Baryonen (von griechisch *barys* für schwer). Tatsächlich sind die Baryonen 2000-mal so massereich wie die den Atomkern umgebenden Elektronen. Aus Experimenten weiß man seit den 1960er Jahren, dass die Baryonen aus noch kleineren Partikeln, den Quarks, zusammengesetzt sind. Fragt man einen Kosmologen nach der durchschnittlichen Baryonendichte, antwortet er: rund 0,2 pro Kubikmeter. Hingegen nennt er für die Anzahl der Lichtquanten im selben Raumvolumen rund zehn Milliarden; das sind die Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung – ein Überbleibsel des Urknalls.

Kosmologen wissen außerdem, dass das Verhältnis zwischen Baryonen- und Photonendichte im Lauf der Zeit konstant bleibt, selbst wenn das All expandiert und sich dabei verdünnt. Die so genannte Baryonenasymmetrie des Universums – die Anzahl der Baryonen geteilt ▷

Nur wenn zwischen Materie und Antimaterie keine vollkommene Symmetrie herrscht, kann das Universum den Stoff enthalten, aus dem wir sind. Hier imitieren Harpo Marx und Lucille Ball in einer Slapstickszene ihre Spiegelbilder. An kleinen Symmetriebrüchen entdecken diese bald das Fehlen des Spiegels und die Realität des anderen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▷ durch die Anzahl der Photonen – beträgt 6×10^{-10}. Diese sonderbare Zahl beunruhigt die theoretischen Physiker. Läge sie näher bei eins, wäre im frühen Universum nichts Besonderes passiert: Alle Teilchen hätten sich bei extrem hohen Temperaturen ungefähr gleich verhalten, und damit wären ungefähr gleich viele Baryonen wie Photonen entstanden. Eine andere natürliche Möglichkeit wäre die Zahl null – was bedeuten würde, dass sich Materie und Antimaterie gegenseitig ausgelöscht hätten.

Freilich gäbe es dann auch keine Physiker, denen solche Fragen den Schlaf rauben könnten, sondern nichts als die Photonen der Hintergrundstrahlung. Dennoch muss ein Null-Baryonen-Universum als natürliche Möglichkeit in Betracht gezogen werden, denn in der Physik gelten normalerweise Symmetrieprinzipien – zum Beispiel für die elektrische Ladung: Zu jedem positiv geladenen Teilchen im All muss es ein negativ geladenes geben.

Sacharows Genieblitz

Hingegen erfordert das baryonische Universum offensichtlich eine gewisse Asymmetrie, und deren Größe muss durch eine Theorie der Baryogenese – der Materieentstehung – geliefert werden (Spektrum der Wissenschaft 12/1998, S. 90). Das erkannte als erster Andrej Sacharow.

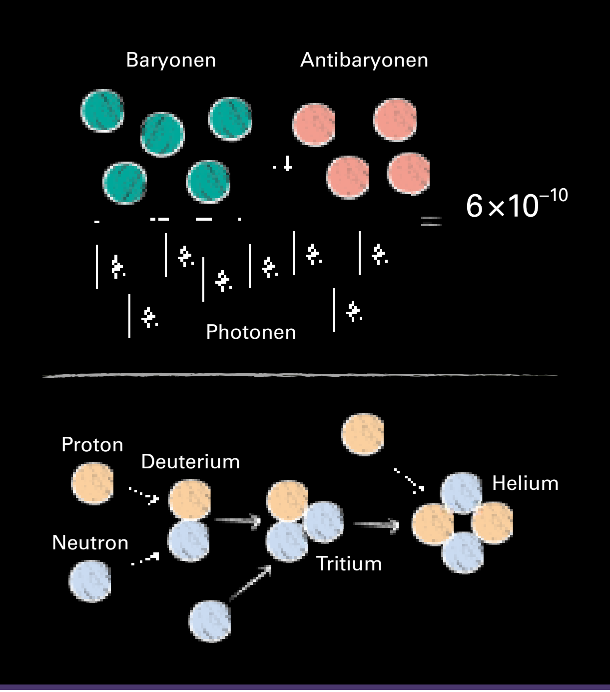
Der russische Theoretiker entwickelte zwei Jahrzehnte lang Nuklearwaffen für die Sowjetunion. Doch allmählich wurde er ein immer schärferer Kritiker des sowjetischen Regimes und 1968 schickte man ihn dafür in die Verbannung (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 82). Während seine politischen Ansichten im Ausland Schlagzeilen und im Kreml Ärger machten, betrat er als Naturforscher kosmologisches Neuland. Zu seinen außerordentlichen Leistungen gehört die Erkenntnis der Bedingungen, die für eine Baryonenasymmetrie erfüllt sein müssen – ein damals absolut origineller Gedanke. Alle Anhänger der Urknalltheorie nahmen seinerzeit an, der Baryonengehalt des Alls könne nicht aus einer vollständigen Theorie der kosmologischen Evolution hervorgehen, sondern müsse als Anfangsbedingung vorausgesetzt werden.

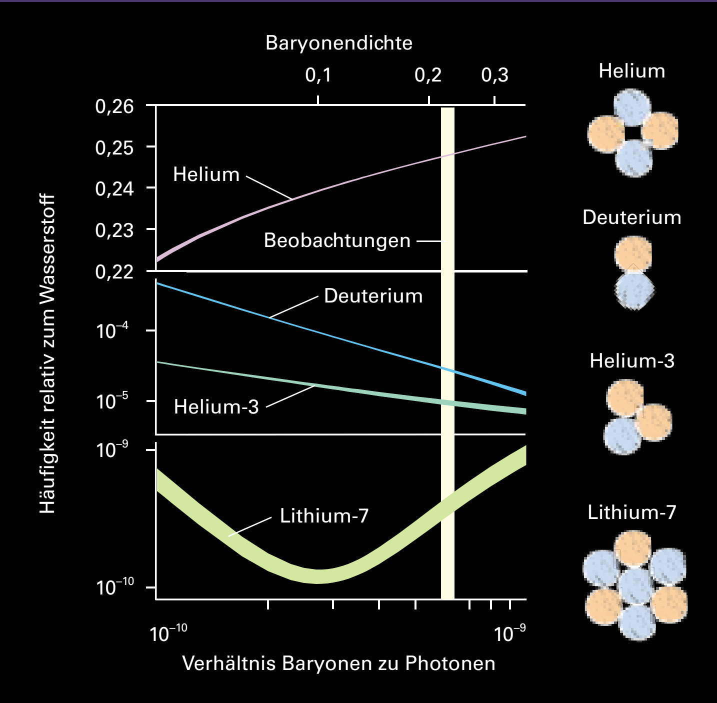
Damals hatten Theoretiker bereits wertvolle Erkenntnisse über die relative Häufigkeit der Elemente im Universum gewonnen. Leichte Elemente wie Helium und Lithium sowie das Wasserstoffisotop Deuterium bildeten sich nur wenige Minuten nach dem Urknall in einer Etappe namens Urknall-Nukleosynthese. Einzelne Protonen und Neutronen vereinten sich zu Atomkernen, die zunächst durch Zusammenstöße mit hochenergetischen Photonen gleich wieder zerplatzten. Doch bei weiterer Abkühlung im Lauf der kosmischen Expansion verloren die Photonen immer mehr an Energie. Offensichtlich hängt die Produktionsrate der Atomkerne vom Verhältnis zwischen Baryonen- und Photonenzahl ab. Einer der großen Erfolge der Urknalltheorie ist, dass sich aus einem passenden Wert der Baryonenasymmetrie die relative Häufigkeit sämtlicher während der Urknall-Nukleosynthese gebildeten leichten Elemente korrekt vorhersagen lässt.

Baryonenasymmetrie und Inflation

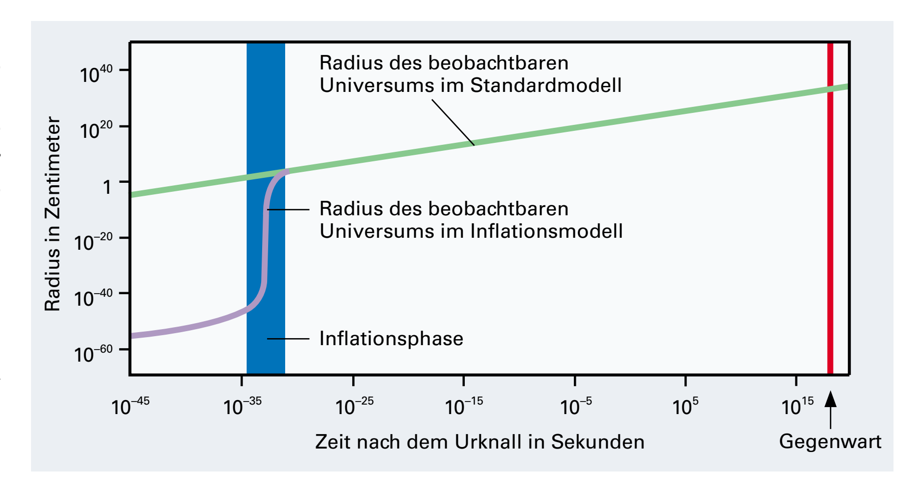
In den letzten Jahren haben unabhängig davon Präzisionsmessungen der winzigen Temperaturfluktuationen im kosmischen Strahlungshintergrund den Wert der Baryonenasymmetrie bestätigt. Diese Fluktuationen enthüllen subtile Details der Schall- oder Druckwellen, die zu der Zeit existierten, als die Atomkerne sich mit Elektronenhüllen umgaben (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48). Durch diesen Prozess, der etwa 100 000 Jahre nach dem Urknall stattfand, konnten sich die Photonen fortan unabhängig von den Atomkernen ausbreiten: Das Universum wurde durchsichtig. Dies ist ein weiterer Erfolg der Urknall-Kosmologie: Die Baryonenasymmetrie wird durch zwei völlig unabhängige Messungen bestätigt.

Die Häufigkeit der leichten Elemente im Universum





Während der kosmischen Inflation – einer Phase exponentieller Expansion des frühen Universums – sank die Baryonendichte rapide. Wäre die Baryonenasymmetrie bereits vor dem Ende der Inflation entstanden, so hätte ihr Anfangswert unnatürlich groß sein müssen.



Aber Physiker finden in jedem noch so schlüssigen Argument ein Schlupfloch. Beispielsweise könnten im gesamten Universum Antibaryonen genauso zahlreich sein wie Baryonen und wir würden nur zufällig in einem von Baryonen dominierten Bereich leben. Dann wäre die echte Baryonenzahl – Teilchen minus Antiteilchen – gleich null. Die Antimaterieregionen müssten allerdings jenseits des sichtbaren Universums liegen, sonst könnten wir Grenzbereiche beobachten, in denen aus der gegenseitigen Vernichtung von Antimaterie und Materie Gammaquanten – extrem energiereiche Photonen – entstünden.

Das ist nicht der Fall, und außerdem gibt es keinen plausiblen Grund, warum sich das frühe All in große, separate Materie- und Antimateriebereiche aufgeteilt haben sollte. Tatsächlich ist es viel leichter, eine Erklärung für die Baryonenasymmetrie zu finden als für eine großräumige Trennung von Materie und Antimaterie.

Doch wie nötig ist solch eine Erklärung überhaupt? Möglicherweise ist die Zahl 6×10^{-10} so gut wie jede andere. Hatten die frühen Urknall-Kosmologen mit ihrer Annahme vielleicht doch Recht, dass es sich dabei einfach um einen zufälligen Anfangswert handelt, der aus dem Chaos des Urknalls hervorging?

Ein triftiges Argument gegen einen bloßen Zufall liefert die kosmische Inflation – eine anfängliche Phase exponentieller Expansion, während der die Temperatur des Universums praktisch null war. Diese Ergänzung der Urknalltheorie wurde in den 1980er Jahren von Alan Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt und Andreas Albrecht vorgeschlagen, die derzeit am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge beziehungsweise an den Universitäten Stanford, Princeton und an der Universität von Kalifornien in Davis tätig sind. Nach diesem Szenario endet die Inflation mit einem Vorgang des Wiederaufheizens, wobei die potenzielle Energie des Vakuums in heiße Teilchen mit einer bestimmten endlichen Anfangstemperatur umgewandelt wird. Im Standard-Urknallmodell steigt die Temperatur hingegen beliebig hoch an, wenn man in der Zeit immer weiter zurückgeht. Aktuelle Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung untermauern das Inflationsszenario. Es erklärt, warum die Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung winzig – bei 0,001 Prozent –, aber doch nicht exakt null sind; Quantenfluktuationen dieser Größenordnung treten in der Inflation ganz natürlich auf.

Durch das während der Inflation explosiv anwachsende Volumen werden die Baryonen rapide verdünnt. Wenn das Ungleichgewicht zwischen Baryonen und Antibaryonen nicht erst während oder nach dem Wiederaufheizen entstanden wäre, müsste die anfängliche Baryonenasymmetrie gigantisch gewesen sein – theoretisch bei 10^{69} –, was noch unnatürlicher wäre als ihr gegenwärtig winziger Wert. Die kosmische Inflation legt also eine dynamische Erklärung für die Asymmetrie nahe.

Die Baryonenasymmetrie im Universum – das Verhältnis zwischen Baryonen (Neutronen und Protonen) und Photonen – beträgt 6×10^{-10}, wobei Antibaryonen negativ gezählt werden (ganz links oben). Die Baryonenanzahl lässt sich aus der relativen Häufigkeit der leichtesten Elemente im All herleiten. Sie bildeten sich während der Nukleosynthese kurz nach dem Urknall, als die Baryonen sich zu Atomkernen verbanden (ganz links unten). Die Elementhäufigkeit hängt von der Baryonenasymmetrie ab (links). Der senkrechte Streifen markiert den Bereich, in dem die Theorie mit den Beobachtungen übereinstimmt.

ALLE GRAFIKEN: EMMA SKURNICK

Die drei Sacharow-Bedingungen

Während Sacharow sich mit der Frage der Baryogenese beschäftigte, erkannte sein russischer Kollege Wadim Kuzmin unabhängig von ihm gewisse dafür notwendige Bedingungen. Als er 1970 seine Theorie veröffentlichte, hinkte er Sacharow zwar drei Jahre hinterher, war aber dem Rest der Welt noch immer sieben Jahre voraus. Denn erst 1977 wurden diese Ideen international wahrgenommen. In ihren Veröffentlichungen nannten Sacharow und Kuzmin drei Bedingungen für die Baryogenese:

Erstens: Die Baryonenzahl darf nicht erhalten bleiben. Es muss also Wechselwirkungen geben, welche die Anzahl der Baryonen im Universum verändern.

Zweitens: Zwei Symmetrien zwischen Teilchen und Antiteilchen müssen verletzt werden.

Drittens: Es muss einen Verlust des thermischen Gleichgewichts geben.

Da die zweite und dritte Bedingung eher abstrakt sind, will ich sie am Beispiel der Großen Vereinheitlichten Theorien (Grand Unified Theories, kurz GUTs) erläutern, die eine der ersten Beschreibungen der Baryogenese lieferten.

Die Grundidee der GUT-Baryogenese ist recht einfach: Hypothetische schwere Teilchen namens X-Bosonen zerfallen bei hohen Temperaturen so, ▷

▷ dass ein Überschuss von Quarks gegenüber Antiquarks zurückbleibt. Beispielsweise könnte das Teilchen X in 51 Prozent der Fälle einem bestimmten Zerfallsweg folgen, das Antiteilche $\bar{X}$ (gesprochen X quer) dem parallelen Pfad in nur 49 Prozent. Eine solche Asymmetrie könnte schnell einen Überschuss an Baryonen erzeugen (siehe Kasten unten).

Rechnen wir das Szenario durch. Da gewöhnliche Baryonen wie Proton und Neutron aus je drei Quarks – vom Typ *up* oder *down* – bestehen, ist die Baryonenzahl eines Quarks 1/3. Bei der Berechnung der Baryonenzahl werden die Antiteilchen subtrahiert. Das Elektron e^- und sein Antiteilchen, das Positron e^+, sind keine Baryonen, werden also nicht mitgezählt. Falls ein X-Boson nun in 51 Prozent der Fälle in zwei *up*-Quarks und in 49 Prozent der Fälle in ein *down*-Antiquark und ein Positron zerfällt, erzeugt ein X-Zerfall durchschnittlich $(2/3 \times 0{,}51) - (1/3 \times 0{,}49) = 0{,}177$ Baryonen.

Das Antiteilchen $\bar{X}$ zerfällt in 49 Prozent der Fälle in zwei *up*-Antiquarks und in 51 Prozent in ein *down*-Quark und ein Elektron. Das erzeugt $(-2/3 \times 0{,}49) + (1/3 \times 0{,}51) = -0{,}157$ Baryonen. Hundert Zerfälle jedes Teilchens liefern netto zwei Baryonen – sogar viel mehr, als für die kleine tatsächlich beobachtete Baryonenasymmetrie erforderlich wäre.

Inwiefern sind Sacharows Gesetze nötig, damit das Szenario funktioniert?

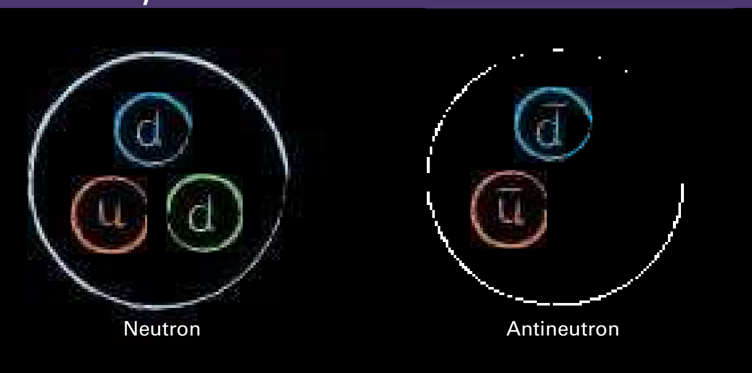
Erstens wird die Erhaltung der Baryonenzahl verletzt: Wenn das X nur in zwei Quarks zerfallen könnte, würden wir ihm die Baryonenzahl 2/3 zuschreiben; wenn es nur in ein Antiquark zerfallen könnte, bekäme es die negative Baryonenzahl –1/3. Da ihm beide Zerfallswege offen stehen, lässt sich dem X keine eindeutige Baryonenzahl zuordnen.

Verletzung der Ladungsparität

Zweitens wird die *CP*-Symmetrie verletzt. *C (charge)* steht für Ladungskonjugation, eine Symmetrieoperation, die ein Teilchen in ein Antiteilchen verwandelt. *P* steht für Parität; diese Operation ändert das Vorzeichen der Raumkoordinaten eines Systems und erzeugt dadurch ein Spiegelbild. Die meisten mikrophysikalischen Prozesse sehen gleich aus, wenn man Teilchen und Antiteilchen vertauscht und zugleich die Paritätstransformation durchführt. Doch in unserem Szenario tritt eine *CP*-Asymmetrie auf: Das Baryon und sein Antiteilchen bevorzugen unterschiedliche Zerfallskanäle.

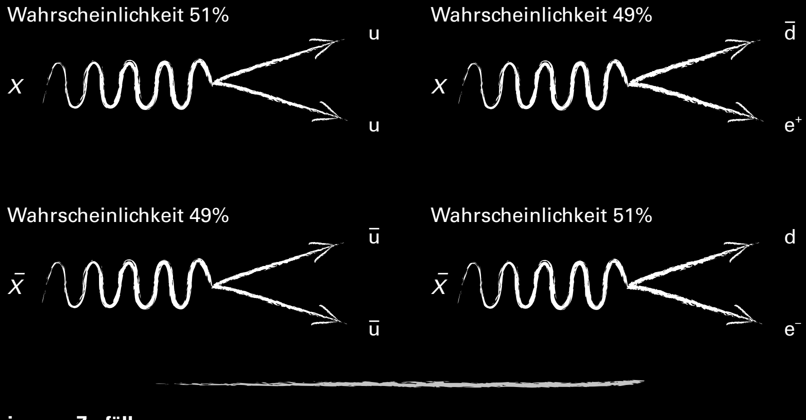
Drittens geht das thermische Gleichgewicht verloren. Ein gutes Beispiel für thermisches Gleichgewicht ist kochendes Wasser in einem Schnellkochtopf. Dabei gehen Wassermoleküle ständig von der flüssigen in die Gasphase über. Bei konstanter Temperatur herrscht im Topf Gleichgewicht, denn die Zahl der in die Gasphase übergehenden Moleküle ist so groß wie die der kondensierenden: Die Mengen von Flüssigkeit und Gas bleiben jeweils konstant. Sobald man den Deckel öffnet, wird dieses Gleichgewicht zerstört. Der Dampf entweicht und die Übergangsrate von Flüssigkeit zu Gas

Wie ein Baryonenüberschuss entstehen kann

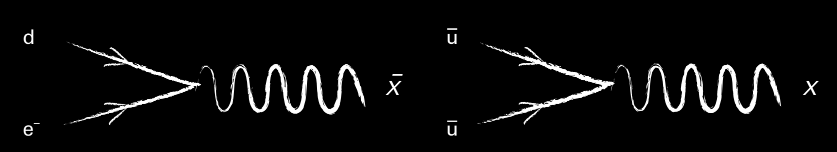


Baryonen sind gebundene Zustände fundamentaler Teilchen, der Quarks, wobei diese vom Typ *up* oder *down* sein können. Das Neutron besteht aus zwei *down*- und einem *up*-Quark. Sein Antiteilchen besteht aus den entsprechenden Antiquarks, die durch einen Querstrich gekennzeichnet werden.

mögliche Zerfälle



inverse Zerfälle



Beim Zerfall subatomarer Teilchen können kleine Asymmetrien auftreten. In diesem Beispiel zerfällt ein hypothetisches X-Boson mit etwas höherer Wahrscheinlichkeit in zwei *up*-Quarks als in ein *down*-Quark und ein Positron. Für das Antiteilchen $\bar{X}$ gelten umgekehrte Wahrscheinlichkeiten: $\bar{X}$ zerfällt eher in ein *down*-Quark und ein Elektron als in zwei *up*-Antiquarks. Das unterste Zerfallsschema zeigt die inversen Zerfälle, bei denen Partikel zu einem neuen X-Boson verschmelzen. Bei ausreichend hohen Temperaturen im frühen Universum laufen Zerfälle und ihre inversen Reaktionen genauso schnell ab – und die Asymmetrie verschwindet.

wird größer als umgekehrt. Führt man weiter Wärme zu, kann das Wasser komplett verdampfen.

Das frühe Universum bietet eine Situation, die dem Öffnen des Deckels entspricht. Im Gleichgewicht zerfallen ständig Baryonen, aber umgekehrt verschmelzen ebenso schnell Quarks zu Baryonen. Die Zerfälle können keine Baryonenasymmetrie erzeugen, weil sie durch die inversen Zerfälle andauernd ausgeglichen wird. Doch wenn das Weltall expandiert, nimmt die Temperatur ab – der Deckel des Schnellkochtopfs steht offen. Bei einer bestimmten Temperatur hat ein Quark-Paar nicht mehr genügend Energie, um ein schweres Teilchen zu erzeugen. Es herrscht Baryonenasymmetrie.

Die *CP*-Verletzung besteht aus zwei Transformationen: *C* vertauscht ein Teilchen gegen ein Antiteilchen; die Rolle der Parität *P* ist etwas weniger offensichtlich. Die Position eines Objekts im Raum lässt sich mit den drei Koordinaten *x*, *y* und *z* beschreiben. Schaut man in einen Spiegel, findet eine Paritätstransformation auf der Achse senkrecht zur Spiegeloberfläche statt. Angenommen, es handelt sich dabei um die y-Achse, und Sie befinden sich an der Position *x*, *y* und *z*, dann liegt Ihr Spiegelbild bei *x*, –*y* und *z*. Eine vollständige Paritätstransformation (–*x*, –*y* und –*z*) in allen drei Raumrichtungen lässt sich durch einen Eckspiegel erzeugen, bei dem drei Spiegel die Ecke eines Würfels bilden.

Der sowjetische Physiker und Bürgerrechtler Andrej Sacharow (1921–1989) war maßgeblich an der Entwicklung der sowjetischen Wasserstoffbombe beteiligt. 1967 formulierte er die nach ihm benannten drei Bedingungen für die Existenz von Materie. 1975 erhielt er den Friedensnobelpreis.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

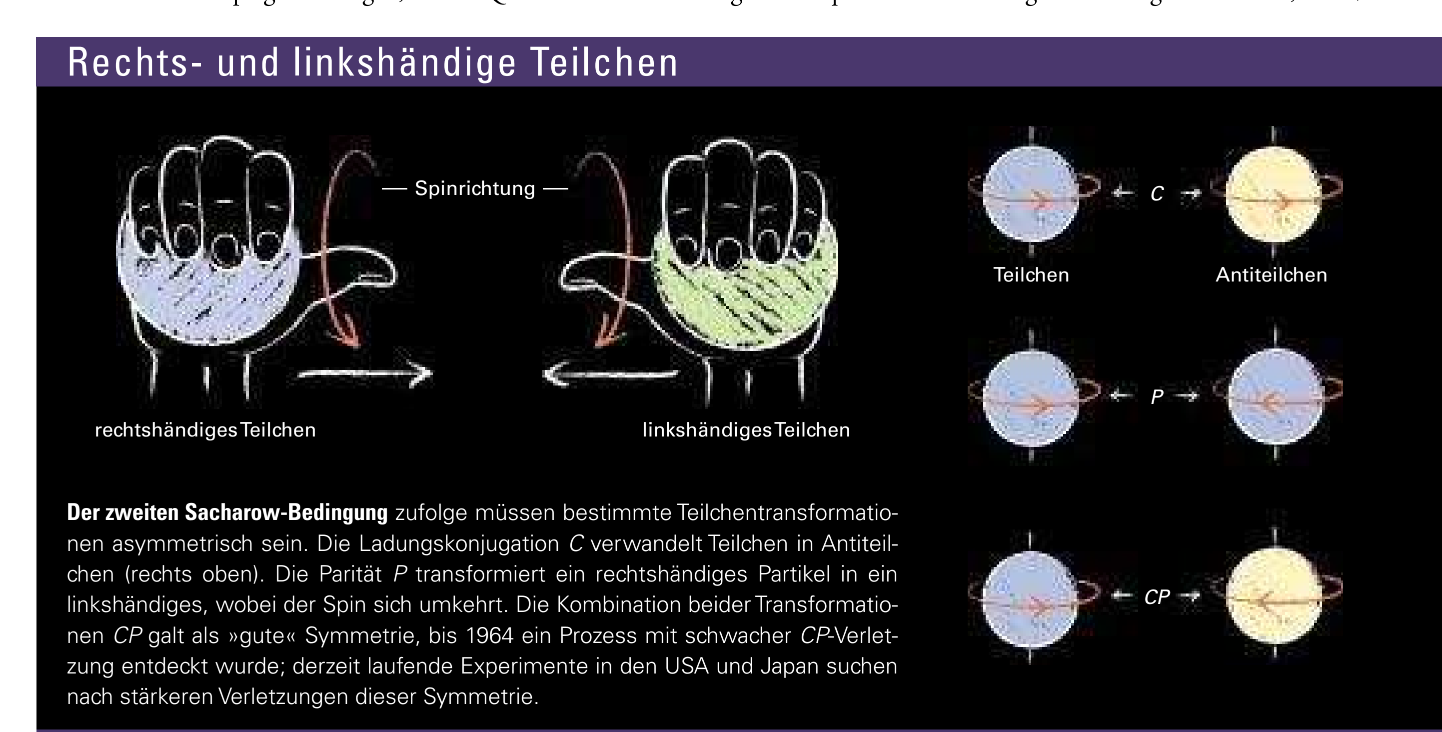
Die Parität ist für die Baryogenese wichtig, weil Quarks nicht nur vom Typ up oder down, sondern auch links- oder rechtshändig sein können. Das lässt sich einfach veranschaulichen: Wenn die Finger der rechten Hand ein hypothetisches Teilchen umfassen, das sich in die Richtung des ausgestreckten Daumens bewegt, ist der rechtshändige Spin des Partikels die Richtung, in die die Finger zeigen. Der Spin eines linkshändigen Teilchens dreht sich in die entgegengesetzte Richtung.

Die Entdeckung der *CP*-Verletzung

Bliebe die *CP*-Symmetrie während der gesamten Geschichte des Universums erhalten, so gäbe es nur eine Teilchenasymmetrie zwischen linkshändigen Quarks und rechtshändigen Antiquarks sowie eine gleich große und entgegengesetzte Asymmetrie zwischen rechtshändigen Quarks und linkshändigen Antiquarks. Dann bliebe die gesamte Asymmetrie zwischen Quarks und Antiquarks weiterhin null.

Seit den 1950er Jahren suchten die Teilchenphysiker intensiv nach Verletzungen der *CP*-Symmetrie. 1964 entdeckten James Christenson, James Cronin, Val Fitch und Rene Turlay am Brookhaven National Laboratory tatsächlich einen Zerfall, der die *CP*-Symmetrie geringfügig verletzte. Sie erkannten, dass zwei vermeintlich unterschiedliche Teilchen in Wirklichkeit ein und dasselbe so genannte Kaon waren. Das neutrale Kaon zerfiel in Zustände mit unterschiedlichen *CP*-Werten. Diese *CP*-Verletzung ist allerdings so schwach, dass ▷

Rechts- und linkshändige Teilchen



Der zweiten Sacharow-Bedingung zufolge müssen bestimmte Teilchentransformationen asymmetrisch sein. Die Ladungskonjugation *C* verwandelt Teilchen in Antiteilchen (rechts oben). Die Parität *P* transformiert ein rechtshändiges Partikel in ein linkshändiges, wobei der Spin sich umkehrt. Die Kombination beider Transformationen *CP* galt als »gute« Symmetrie, bis 1964 ein Prozess mit schwacher *CP*-Verletzung entdeckt wurde; derzeit laufende Experimente in den USA und Japan suchen nach stärkeren Verletzungen dieser Symmetrie.

Ein Schema des Sphaleron-Prozesses

Eine Verletzung der Baryonenzahl kann aus der so genannten Sphaleron-Wechselwirkung zwischen Quarks und Leptonen entstehen. Dabei reagieren Quarks aus den drei Familien des Standardmodells mit je einem Lepton der entsprechenden Lepton-Familien (links). Bei tiefen Temperaturen kann dies nur sehr selten geschehen, und zwar durch so genanntes Quantentunneln: Das System muss eine Energiebarriere durchstoßen (oben). Bei hohen Temperaturen wird die Barriere hingegen ohne weiteres überwunden.

sie nicht einmal die winzige tatsächlich beobachtete Baryonensymmetrie zu erzeugen vermag. Daher hoffen die Physiker auf die Entdeckung stärkerer Effekte. Mit dem Babar-Experiment am Stanford Linear Accelerator Center in den USA und dem Belle-Experiment in Japan wird nach *CP*-Verletzungen bei Wechselwirkungen zwischen bestimmten schweren Quarks gesucht.

Entstand die Materie in Blasen?

Sacharow wusste noch nicht, dass die erste seiner symmetriebrechenden Bedingungen, die Verletzung der Baryonenzahl, innerhalb des Standardmodells der Elementarteilchenphysik möglich ist. Der Vorgang heißt Sphaleron (von griechisch »bereit zu fallen«).

Das Standardmodell vereinigt den Elektromagnetismus und die schwache Kernkraft zur so genannten elektroschwachen Kraft. Sie lässt eine Wechselwirkung zwischen neun Quarks und drei leichten Teilchen namens Leptonen (von griechisch *leptos* für leicht) zu. Das Sphaleron wurde 1984 von Frans Klinkhamer und Nicholas Manton – heute an den Universitäten Karlsruhe beziehungsweise Cambridge – erstmals mathematisch beschrieben. Obwohl der Sphaleron-Prozess experimentell nie bestätigt wurde, bezweifelt kein Theoretiker seine Gültigkeit.

Damit die Baryonenzahl verletzt wird, muss man drei Quarks aus jeder der drei Teilchenfamilien des Standardmodells nehmen – aus der gängigen Familie der *up-* und *down*-Quarks sowie aus zwei schwereren Quarksorten, die erst in Teilchenbeschleunigern entdeckt wurden – und mit je einem Lepton aus den entsprechenden Lepton-Familien zusammenbringen. Bei niedrigen Temperaturen ist dafür ein quantenphysikalischer Tunnelvorgang nötig; das heißt, das Teilchensystem vollzieht einen Übergang, der eigentlich zusätzliche Energie erfordert.

Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist freilich so winzig, dass ein Sphaleron-Prozess weder im Labor noch im beobachtbaren Universum zu erwarten wäre. Doch wie Kuzmin und seine russischen Kollegen Walerij Rubakow und Michail Schaposchnikow 1985 erkannten, konnte im frühen Universum die Energiebarriere, welche die Verletzung der Baryonenzahl normalerweise verhindert, dank der hohen Temperaturen tatsächlich durch thermische Energie überwunden werden. Noch wichtiger war die Erkenntnis, dass die Barriere ihrerseits bei genügend hohen Temperaturen kleiner wird und schließlich sogar verschwindet.

Das Sphaleron bedeutet, dass zwei von Sacharows drei Kriterien – Verletzung der *CP*-Symmetrie und der Baryonenzahl – in der Natur bereits realisiert sind. Was ist mit dem dritten Kriterium, dem Verlust des thermischen Gleichgewichts?

Tatsächlich gibt es in der elektroschwachen Theorie bei hohen Temperaturen einen entsprechenden Vorgang. Dabei geschieht das Umgekehrte wie bei kochendem Wasser: Im jungen Universum bilden sich Blasen, während das All abkühlt. Außerhalb der Blasen herrscht ein exotischer Phasenzustand, bei dem alle Teilchen masselos sind. Nur inner-

Blasen in einem exotischen

Gemäß der elektroschwachen Theorie entstanden bei der Abkühlung des jungen Universums Blasen, in denen die Teilchen Masse trugen und der üblichen Physik gehorchten, während außerhalb eine masselose Phase herrschte. Die Blasen expandierten allmählich und verdrängten schließlich die exotische masselose Phase.

halb der Blasen gewinnen die Partikel ihre übliche Masse und gehorchen der uns vertrauten Physik. Die Blasen expandieren und verdrängen schließlich die exotische masselose Phase aus dem Universum. Physiker nennen einen solchen Prozess einen Phasenübergang erster Ordnung.

Was hat das mit der Baryogenese zu tun? Innerhalb der Blasen – in der Domäne herkömmlicher Physik – sind die Sphaleron-Prozesse, welche die Baryonenzahlverletzung verursachen, viel schwächer als außerhalb. Außerhalb fehlt die Energiebarriere, durch die die Sphalerons normalerweise hindurchtunneln müssen. Darum gibt es dort eine starke Verletzung der Baryonenzahl. Schließlich werden die Sphalerons bei niedrigen Temperaturen so schwach, dass sie ganz zu vernachlässigen sind.

Gemäß der elektroschwachen Theorie muss jedes Teilchen schließlich eine Blasenwand passieren, wenn die Blasen expandieren und den gesamten Raum ausfüllen. 1990 erkannten Andrew Cohen von der Universität Boston und Ann Nelson, die heute an der Universität Washington arbeitet, dass dadurch Baryogenese stattfinden kann. Treffen Quarks von außen auf die Wände, durchstoßen sie diese mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit oder werden wieder reflektiert. Durch die *CP*-Verletzung ist der Vorgang für Quarks und Antiquarks oder für rechts- und linkshändige Quarks nicht gleich wahrscheinlich. Angenommen, in der masselosen Phase außerhalb der Blasen bildet sich ein Überschuss an linkshändigen Antiquarks. Die Sphalerons versuchen diese Asymmetrie zu beseitigen, aber dadurch verändern sie die Gesamtzahl der Baryonen – sie erzeugen eine Baryonenasymmetrie. Schließlich stürzen diese Baryonen in die Blasen, die das Universum immer weiter ausfüllen (siehe Bild auf der folgenden Seite).

Die Sphalerons im Innern der Blasen verlaufen viel langsamer als außerhalb, sind somit nicht im Gleichgewicht. Das ist ein entscheidender Punkt: Andernfalls würden die Sphalerons im Blaseninnern die von den Sphalerons außerhalb der Blasen aufgebaute Bayronenasymmetrie beseitigen.

Über das Standardmodell hinaus

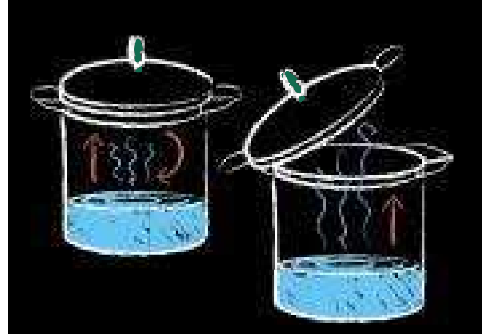
In dieser Diskussion sind wir dem Weg gefolgt, den ich zusammen mit meinem Mitarbeiter Kimmon Kainulainen von der Universität Jyväskylä (Finnland) beschritten habe, um die Baryogenese zu erklären – leider vergeblich. Dabei gelangten wir bis zu einem quantitativen Test der Theorie: Sind die Sphalerons im Innern der Blasen langsam genug, um die beobachtete Baryonenasymmetrie zu erzeugen? Das hängt von der Größe der Energiebarriere ab, die sie überwinden müssen – mit anderen Worten von der Stärke des Phasenübergangs. Ist er zu schwach, so fällt auch die Baryonenasymmetrie zu schwach aus.

Schaposchnikow und andere fanden heraus, dass im Standardmodell der Elementarteilchenphysik die Größe des Phasenübergangs davon abhängt, ob bestimmte Teilchen, die Higgs-Bosonen und die *top*-Quarks, genügend leicht sind. Den jüngsten Beschleunigerdaten zufolge sind sie ziemlich schwer. Demnach ist der Phasenübergang zu schwach, um die Baryogenese zu erklären. Sacharows Bedingungen lassen sich daher nicht alle im Rahmen des Standardmodells erfüllen.

Welche neue Physik könnte die Situation retten? Einer der am besten begründeten Ansätze heißt Supersymmetrie und geht auf Arbeiten von Jurij Golfand und seinen Kollegen am Moskauer Lebedew-Institut aus dem Jahr 1970 zurück. Die Supersymmetrie erweitert die im Standardmodell gültigen Symmetrien, indem sie für jedes Teilchen mit halbzahligem Spin, wie Quarks und Leptonen, einen Superpartner mit Spin null postuliert. Solche Partikel hat man bislang noch nicht gefunden; man führt das auf ihre großen Massen zurück, die jenseits heutiger Nachweismöglichkeiten liegen.

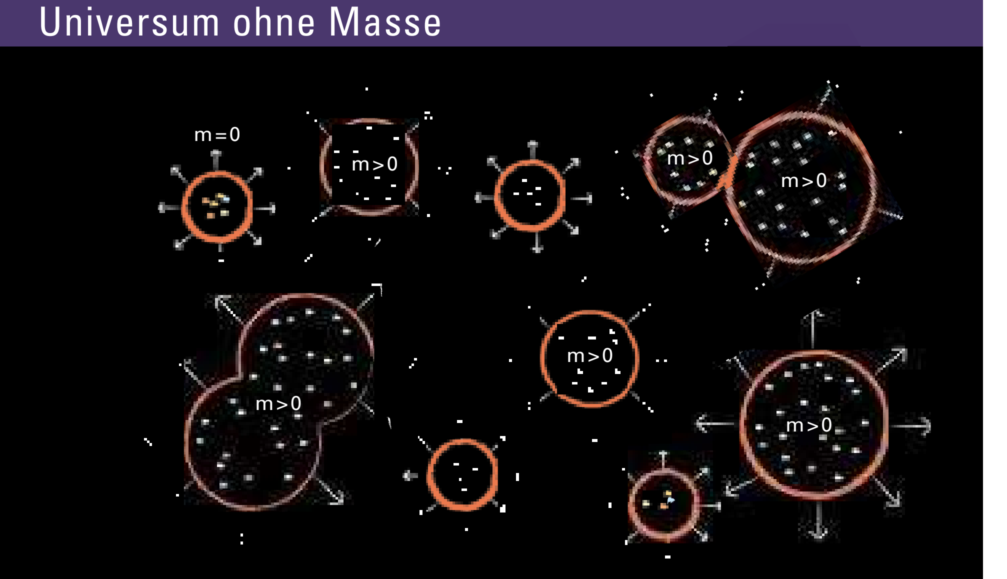
Die neuen supersymmetrischen Teilchen verstärken den elektroschwachen Phasenübergang, indem sie die Energiebarriere für Sphalerons erhöhen und dadurch die Baryonen in den Blasen vor den Auswirkungen durchgelassener Sphalerons schützen. Die Supersymmetrie liefert zwar stärkere *CP*-Verletzungen als das Standardmodell, aber dies erweist ▷

Nicht im Gleichgewicht



Die dritte Sacharow-Bedingung verlangt den Verlust des thermischen Gleichgewichts – hier veranschaulicht durch Öffnen eines Kochtopfs mit fest schließendem Deckel. Die Expansion des Universums lässt sich mit dem Öffnen des Deckels vergleichen. Wenn das Universum nach dem Urknall abkühlt, erreicht es schließlich eine Temperatur, bei der zwei Quarks nicht mehr genügend Energie haben, um ein X-Boson zu erzeugen.

Universum ohne Masse



▷ sich auch als die Achillesferse des Modells. Die Prozesse, welche die *CP*-Symmetrie brechen, erzeugen zugleich bei Quarks, Elektronen, Neutronen und Atomkernen elektrische Dipolmomente, die jenseits der experimentell ermittelten Obergrenzen liegen. Anfangs schien die supersymmetrische *CP*-Verletzung eine große Baryonenasymmetrie und gleichzeitig kleine elektrische Dipolmomente zuzulassen. Doch auf Grund der experimentellen Daten gilt diese Hoffnung als immer unwahrscheinlicher.

Die meisten Fachleute betrachten den supersymmetrischen Erklärungsansatz für die elektroschwache Baryogenese daher als gescheitert. Um ihn zu retten, müsste man das Modell um zusätzliche Teilchen und Wechselwirkungen erweitern. Hinweise auf solche Zutaten lassen sich womöglich entdecken, wenn der nächste große Teilchenbeschleuniger, der Große Hadronen-Collider am Europäischen Labor für Elementarteilchenphysik Cern bei Genf, 2007 den Betrieb aufnimmt (Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 68). Bis dahin erscheinen die ausgeschmückten Versionen der Theorie ziemlich spekulativ.

Die Leptogenese

Die Nachfolge der elektroschwachen Baryogenese trat deshalb die Leptogenese an. Obgleich die elektroschwache Theorie die Sacharow'schen drei Bedingungen für Baryonen selbst nur schwer zu erfüllen vermag, lässt sich von ihr ausgehend eine Asymmetrie bei anderen Teilchensorten erzeugen.

Oben erwähnte ich die Leptonen, zu denen Elektronen, Myonen, Tauonen und Neutrinos gehören. Man könnte sich eine Asymmetrie zwischen Neutrinos und Antineutrinos vorstellen – aber wir bestehen doch aus Baryonen und nicht aus Neutrinos! Erinnern wir uns, dass an Sphalerons sowohl Leptonen als auch Quarks beteiligt sind. Daher verwandelt sich eine Leptonenasymmetrie bei hohen Temperaturen zumindest teilweise in eine Baryonenasymmetrie. Sphaleron-Prozesse wirken wie ein offenes Ventil, das Leptonen- und Baryonenasymmetrien einander angleicht.

Die Leptogenese beruht auf dem Zerfall hypothetischer schwerer Neutrinos, deren Existenz wiederum erklärt, warum die Neutrinos im Standardmodell fast masselos sind. Ihre winzige Masse und die elektrische Neutralität machen Neutrinos zu geisterhaften Teilchen: Obwohl sie im Universum so häufig wie Photonen vorkommen, treten sie mit anderen Teilchen kaum in Wechselwirkung. Daher war die Frage, ob sie Masse haben und wie groß diese ist, so schwer zu beantworten. Seit sich immer deutlicher zeigt, dass Neutrinos eine nicht verschwindende Masse besitzen, steigt das Interesse an der Leptogenese als Schlüssel zur Baryogenese.

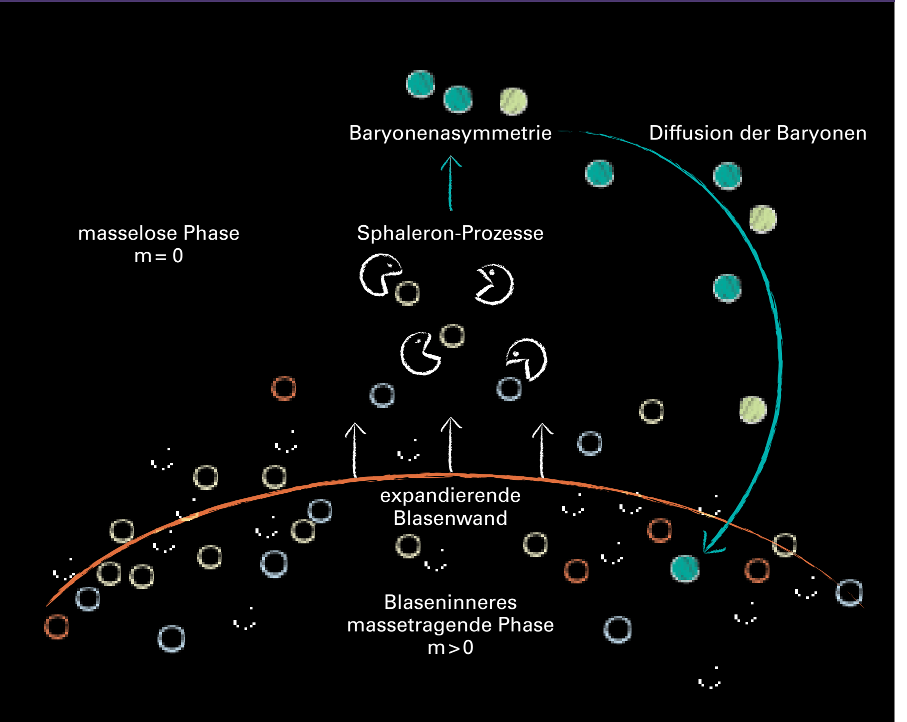
Leider weiß man nicht, ob dieses Modell sich direkt überprüfen lässt. Dass die bekannten Neutrinomassen zu den Anforderungen der Leptogenese passen, ist ein ermutigendes Zeichen, aber noch lange kein Beweis. Vielleicht können künftige Beobachtungen seltener Zerfälle – etwa der Zerfall des schweren Myons in ein Elektron und ein Photon – weitere Indizien liefern.

Die Strings und das anthropische Prinzip

Jüngste Entwicklungen einer fundamentalen Theorie, der so genannten Stringtheorie, versprechen Antworten auf unsere offenen Fragen – eigentlich liefern sie sogar eine Fülle von Theorien, die jeweils für einen eigenen Bereich des Universums gelten könnten (Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24). Praktisch müsste man diese unterschiedlichen Bereiche des Alls sogar als völlig getrennte Universen auffassen, da ein Informationsaustausch zwischen ihnen nicht möglich wäre. A priori vermögen wir nicht vorherzusagen, welche Version der Theorie für das Gebiet gilt, in dem wir zufällig leben.

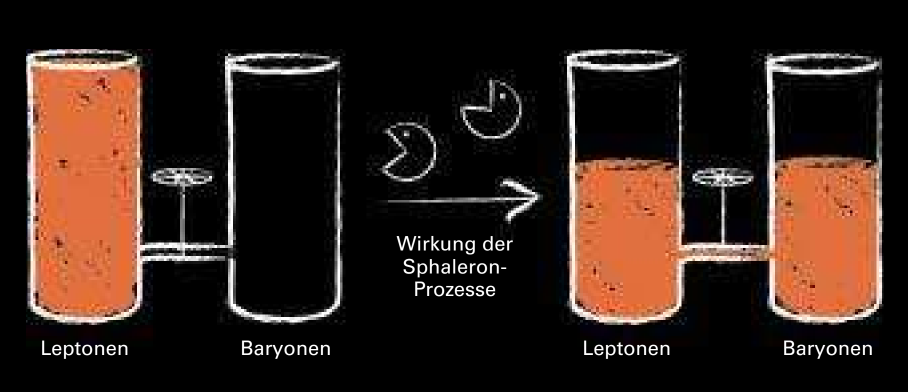
Allerdings sind nur einige Versionen der Stringtheorie mit unserer Existenz vereinbar – die übrigen entsprechen Universen, in denen kein Leben möglich ist. Manche Physiker berufen sich deshalb auf das so genannte anthropische Prinzip

Baryonenüberschuss durch Sphalerons?



Innerhalb der Blasen sind die Sphaleron-Prozesse viel schwächer als außerhalb, wo sie keine Energiebarriere durchtunneln müssen. Dies liefert einen Mechanismus für die Baryogenese. In der masselosen Phase kann eine Überzahl von linkshändigen Antiquarks entstehen. Die Sphalerons suchen diese Asymmetrie zu beseitigen, doch dabei ändern sie die Gesamtzahl der Baryonen – sie erzeugen eine Baryonenasymmetrie. Die Baryonen diffundieren in die Blasen, die das Universum zunehmend ausfüllen. Leider bilden sich im Standardmodell der Teilchenphysik die Blasen nur, wenn bestimmte Partikel relativ leicht sind – im Widerspruch zu Resultaten neuerer Beschleunigerexperimente.

Wie durch leichte Teilchen schwere entstehen



Die Leptogenese – die Bildung leichter Teilchen namens Leptonen – gilt als möglicher Weg zur Materieentstehung. Eine Asymmetrie zwischen bestimmten Leptonen und ihren Antiteilchen kann durch Sphaleron-Prozesse in eine Baryonenasymmetrie übergehen. Das Sphaleron wirkt wie ein offenes Ventil, das Leptonen- und Bayronenasymmetrie angleicht. Für diesen Mechanismus spricht die Entdeckung, dass Neutrinos eine nicht verschwindende Masse haben.

und argumentieren: In unserem Universum muss eine Version der Theorie gelten, die unser Dasein überhaupt erst ermöglicht.

Das anthropische Prinzip beschränkt viele Parameter in den uns bekannten physikalischen Gesetzen: Sie müssen so beschaffen sein, dass sie lebende Beobachter zulassen. Ist auch die Baryonenasymmetrie ein Beispiel dafür? Welche Werte sind mit unserer eigenen Existenz verträglich? Offenbar erfüllen Größen zwischen 10^{-4} und 10^{-11} diese Bedingung. Sie sind einerseits gerade groß genug, um ausreichend Materie für die Entwicklung von Sternen und Galaxien zu liefern; andererseits sind sie wiederum nicht so groß, dass die Helium- die Wasserstoffproduktion übersteigt – denn dann gäbe es kein Wasser und die Sterne würden verglühen, bevor die Temperatur des Alls Leben ermöglichen könnte. Da diese Schranken einen relativ großen Wertebereich zulassen, beeinflusst das anthropische Argument die Theorie nicht allzu stark. Wir können also getrost nach dynamischen, deterministischen Erklärungen für den Ursprung der Materie suchen.

Die derzeit populäre Theorie der Leptogenese hat – sofern sie zutrifft – eine paradoxe Folge: Der Ursprung der massereichsten Objekte im Universum lässt sich auf die flüchtigsten Teilchen zurückführen – die Neutrinos. Ich für meinen Teil setze meine Hoffnungen weiter in die supersymmetrische elektroschwache Baryogenese. Vielleicht gibt es Schlupflöcher dieser Theorie, die bislang übersehen worden sind und mit dem Großen Hadronen-Collider erschlossen werden können.

Wie auch immer die richtige Erklärung aussehen mag – eine erfolgreiche, überprüfbare Theorie der Materieentstehung wäre in jedem Fall die größte Ehre, die wir Andrej Sacharow posthum erweisen könnten. Und vor allem würde sie endgültig eine zutiefst menschliche Sehnsucht stillen: zu wissen, woher wir kommen. ◁



AUTOR UND LITERATURHINWEISE


James M. Cline ist Professor für Physik an der McGill-Universität in Montreal (Kanada). Er untersucht die Auswirkungen der Elementarteilchenphysik auf die Kosmologie sowie die gegenwärtig beschleunigte Expansion des Universums.

Origin of the matter-antimatter asymmetry. Von M. Dine und A. Kusenko, in: Reviews of Modern Physics, Bd. 76, S. 1 (2004)

Electroweak baryogenesis. Von M. E. Shaposhnikov, in: Contemporary Physics, Bd. 39, S. 177 (1998)

CP-nonvariance and baryon asymmetry of the universe. Von V. A. Kuzmin, in: JETP, Bd. 12, S. 228 (1970)

Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. Von A. D. Sakharov, in: JETP Letters, Bd. 5, S. 24 (1967)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

SIEMENS CORPORATE TECHNOLOGY

Eiskalter Schiffsantrieb

Der Diesel hat ausgedient, denn Supraleitung lässt Elektromotoren schrumpfen.

Von Bernhard Gerl

Elektromotoren dienen heute in vielen Bereichen der Technik als Arbeitspferde, denn sie funktionieren sehr zuverlässig und setzen die aufgewandte Energie mit hohem Wirkungsgrad in Antrieb um. Doch mitunter stößt diese Technik auf Grund der verwendeten Materialien an ihre Grenzen.

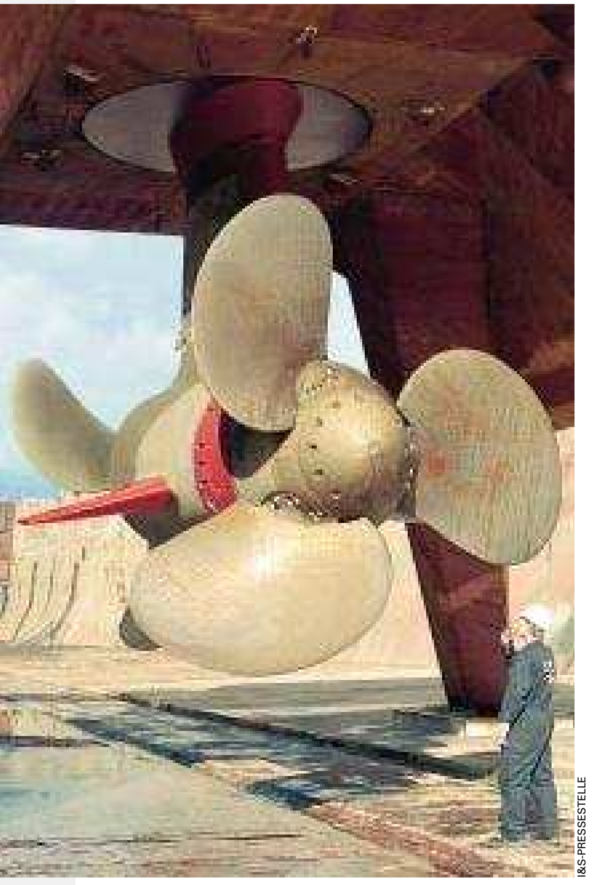
Die wichtigsten Komponenten sind Spulen, meist aus Kupfer, in denen elektrische Ströme fließen und so Magnetfelder erzeugen (deren Wechselwirkung bringt die Drehbewegung hervor). Hinzu kommen Eisenkerne, um die Felder zu lenken und zu verstärken. Diese Werkstoffe machen leistungsstarke Elektromotoren groß und schwer und begrenzen die Feldstärke, zum Beispiel wegen der Wärmeverluste in den Kupferleitungen.

Der Siemenskonzern entwickelt nun – mit Unterstützung durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) – einen deutlich kompakteren Elektromotor, in dem die Spule des bewegten Bauteils (Rotor beziehungsweise Läufer) aus Hochtemperatursupraleitern (HTSL) gewickelt ist. Bei sehr tiefen Temperaturen verschwindet deren elektrischer Widerstand, demzufolge wird dort keine Abwärme erzeugt (siehe Kasten). Doch diese Werkstoffe bestehen aus spröder Keramik. Beim Versuch sie zu biegen oder gar zu wickeln, würden sie brechen.

Die Lösung: Dünne Supraleiterfasern werden in eine metallische Matrix eingebettet. Derartige Leiter sind heute kommerziell erhältlich und werden von Jahr zu Jahr leistungsfähiger und auch preiswerter. Ein Vergleich zeigt den Vorteil für die Läuferwicklung großer Elektromotoren: Sollen durch einen Kupferdraht 100 Ampere fließen, dann muss er eine Querschnittsfläche von 30 Quadratmillimetern haben, beim Hochtemperatursupraleiter reicht ein Quadratmillimeter.

Doch kann eine solche Wicklung den mechanischen Beanspruchungen im Motor dauerhaft standhalten? Und wie ist es möglich, die Wicklungen dort auf die Betriebstemperatur von 25 Kelvin abzukühlen? Siemensforscher Wolfgang Nick und sein Team haben dazu folgende Technik entwickelt: Über ein dünnes Rohr fließt flüssiges Neon durch eine Hohlwelle in die Mitte des Läufers, nimmt dort Wärme auf, verdampft und gelangt als Gas durch dasselbe Rohr wieder nach außen. Hier kondensiert es an einem Kühlkopf und fließt zurück – der Kreislauf ist geschlossen. Dieses System braucht keine aktive Umwälzung des Kühlmittels, regelt sich automatisch und arbeitet obendrein wartungsfrei.

Die Siemensingenieure steckten die neue Technik vor etwa drei Jahren in das Gehäuse eines 400-Kilowatt-Synchronmotors. Die HTS-Maschine samt zugehöriger Kühlung – dank der guten ther-



I&S-PRESSESTELLE

Ein moderner Pod-Schiffsantrieb wird von Elektromotoren in Gang gesetzt. Wenn sich im Innern der Gondel ein supraleitender Motor befände, könnte sie noch kompakter und damit strömungsgünstiger konstruiert werden.

Der 400-kW-Supraleitungsmodellmotor im Systemtest. Äußerlich wirkt die Maschine konventionell, ungewöhnlich ist aber schon das Rotorkühlsystem (grün beleuchtet), umgeben von Mess- und Überwachungsgeräten.



SIEMENS AG

Supraleitung

Ein leitfähiger Draht besteht – aus der Sicht des Theoretikers – aus einem Gitter regelmäßig angeordneter Atome und freier Elektronen, die sich dazwischen bewegen. Letztere bilden eine Art See, eine elektrische Spannung bringt sie ins Fließen. Auf ihrem Weg stoßen sie aber immer wieder mit Atomen zusammen, da diese auf Grund der Temperatur des Drahts hin- und herschwingen – es entsteht elektrischer Widerstand. Bei einigen Metallen und Keramiken verschwindet er um den absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad Celsius, 0 Kelvin) vollständig. Dieses Phänomen nannte sein Entdecker Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926, Nobelpreis 1913) Supraleitung.

Bis vor wenigen Jahrzehnten ließ sie sich nur durch Kühlung mit flüssigem Helium erreichen, ein breiter technischer Einsatz erfolgte nicht. Doch 1986 entdeckten die Physiker Johannes G. Bednorz und Karl A. Müller (Nobelpreis 1987) den ersten Hochtemperatursupraleiter. Minus 183 bis minus 143 Grad Celsius (90 bis 130 Kelvin) reichen bei diesen Materialien aus, um den elektrischen Widerstand verschwinden zu lassen. Das lässt sich bereits mit dem billigeren flüssigen Stickstoff erreichen (Siedepunkt: minus 195,8 Grad Celsius, 77,35 Kelvin).

Bislang versteht man allerdings nur die Grundlagen der klassischen Supraleitung. Unterhalb der »Sprungtemperatur« verbünden sich zwei Elektronen demnach zu so genannten Cooperpaaren: Passiert ein Elektron ein Atom des Gitters, beginnt dieses zu schwingen und gibt die Bewegung an seinen Nachbarn weiter, sodass eine Welle durch den Kristall läuft. Es ist für zwei Elektronen energetisch günstig, sich mit dieser Schwingung gemeinsam durch das Gitter zu bewegen. Das Cooperpaar erfährt keinen elektrischen Widerstand mehr. Leider versagt diese Theorie bei Hochtemperatursupraleitern, doch einige Physiker hoffen, dass eine leichte Modifikation das Phänomen erklären wird.

mischen Isolierung des Läufers reichten 20 Watt Kühlleistung aus – demonstriert seitdem in Betrieb beziehungsweise Bereitschaft ihre Zuverlässigkeit. Messungen ergaben bei dem nicht optimierten Versuchsmodell bereits einen um ein Prozent höheren Wirkungsgrad als bei einem vergleichbar starken konventionellen Motor. Außerdem läuft dieser Antrieb sehr ruhig.

Warten auf billigere Supraleiter

Die zehnfache Leistung soll nun ein Nachfolgemodell bringen, das als Generator auf vollelektrischen Schiffen eingesetzt werden kann. Diese modernen Fahrzeuge kommen ohne den oft mehrere hundert Tonnen schweren Antriebsdiesel aus. Stattdessen liefern diesel- oder gasturbinengetriebene Generatoren den Strom für Elektromotoren, die dann die Schrauben antreiben.

Eine solche Kombination gibt dem Konstrukteur Freiheiten, denn er kann die Komponenten im Schiff verteilen. Der konventionelle Antriebsdiesel hingegen steht auf Grund seiner Größe in der Schiffsmitte, sein Drehmoment wird über schwere Wellen auf die Schrauben übertragen. Elektromotoren können sogar außerhalb des Rumpfs als so genannte Pod-Antriebe (*pod:* englisch für »Gondel«) untergebracht werden. Diese sind um 360 Grad drehbar und verbessern somit die Manövrierbarkeit des Fahrzeugs (siehe Foto links).

HTS-Motoren und -Generatoren eignen sich natürlich nicht nur für Schiffe. Weitere Einsatzfelder sehen die Siemensplaner zum Beispiel in Windkraftwerken, wo ebenfalls geringes Gewicht günstig ist, und in Großkraftwerken zur Stromerzeugung, weil sich dort der höhere Wirkungsgrad auszahlt. Ob sich Hochtemperatursupraleiter in Motoren und Generatoren durchsetzen werden, hängt vor allem vom Preis der Leiter ab. Um achtzig Prozent könnte er wohl fallen, sobald größere Mengen davon hergestellt werden, vermutet Wolfgang Nick. Spätestens dann biete die Supraleitungstechnik eine wirtschaftliche Alternative. ◁

Der Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als Fachautor in Regensburg.

Lernen im Schlaf – kein Traum

Wenn der Mensch allabendlich seine müden Glieder zur Ruhe bettet, macht das Gehirn nur scheinbar eine Pause. In Wahrheit nutzt es den bewusstlosen Dämmerzustand, um Neuigkeiten des Tages dauerhaft im Gedächtnis zu verankern.

Von Jan Born und Ulrich Kraft

Schlummern, dösen, dämmern, pennen, pofen, ratzen, dachsen, heia machen … Für kaum eine Sache gibt es so viele – zum großen Teil umgangssprachliche oder regionale – Synonyme wie für das Schlafen. Was sich wohl einfach damit erklären lässt, dass jeder Mensch es tut – und das meist gerne. Goethe zum Beispiel, ein bekennender Anhänger des ausgedehnten Schlummers, beschrieb den Schlaf fast liebevoll:

Ein treuer Freund, der allen frommt,
gerufen oder nicht, er kommt.
Gern mag er Elend, Sorge, Pein
mit seinem sanften Schleier decken,
und selbst das Glücke wiegt er ein,
zu neuen Freuden es zu wecken.

Die medizinische Definition klingt da weitaus nüchterner: Schlaf ist der regelmäßig wiederkehrende Zustand einer jederzeit reversiblen, mehr oder weniger ausgeprägten Bewusstlosigkeit. Doch damit fängt das eigentliche Rätsel erst an. Warum schlafen wir überhaupt? Was macht es für einen Sinn, dass sich der Geist tägliche Auszeiten nimmt und wir für insgesamt fast ein Drittel unseres Lebens in einen bewusstlosen Dämmerzustand versinken? Evolutionsbiologisch betrachtet, birgt schon ein kurzes Nickerchen enorme Risiken für den Organismus; denn mit schwindendem Bewusstsein verliert jedes Lebewesen auch die Kontrolle über sein Verhalten und kann somit auf Bedrohungen nicht mehr unmittelbar reagieren. Heute, da wir uns meist geschützt von Mauern und Fenstern zur Ruhe betten, ist dieses Problem von untergeordneter Bedeutung, aber in den Zeiten der Jäger und Sammler?

Zu schlafen muss also trotz der damit verbundenen Risiken einen Überlebensvorteil bieten, sonst wäre Goethes »treuer Freund« schon lange vor des Dichters Tagen der evolutionären Selektion zum Opfer gefallen. Manche Wissenschaftler vertreten die Theorie, dass wir die durchschnittlich sieben Stunden Nachtruhe benötigen, damit der Körper sich erholen und regenerieren kann. Für diese Wartungsarbeiten schaffe der Schlaf die besten Bedingungen, argumentiert etwa Jerome M. Siegel, Professor für Psychiatrie an der Universität von Kalifornien und ehemaliger Präsident der amerikanischen Schlafforschungsgesellschaft (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2004, S. 30). Doch solche Regenerationsprozesse verlangen eigentlich keinen Verlust des Bewusstseins; die vorübergehende Inaktivierung des Organismus – also eine rein körperliche Ruhepause bei wachem Geiste – würde diese Aufgabe ebenso gut erfüllen.

Die nahe liegende Schlussfolgerung: Während wir schlummern, muss im Gehirn etwas passieren, das sich mit der bewussten Verarbeitung von Reizen nicht vereinbaren lässt. Des Rätsels Lösung mag manchen Schüler oder Studenten vor der Prüfung ruhiger schlafen lassen. Nach heutigem Stand des Wissens braucht das Denkorgan die Nachtruhe, um zuvor erlernte Informationen und Fähigkeiten dauerhaft zu speichern. Wenn wir bewusstlos vor uns hindämmern, erlischt im Oberstübchen also keineswegs das Licht. Im Gegenteil: Es herrscht emsige Betriebsamkeit, auch wenn der Energieverbrauch etwas gedrosselt ist. Das Gehirn arbeitet die Erlebnisse des Tages auf und befördert Wichtiges in das Langzeitgedächtnis. Ohne Schlaf würde der Mensch – zumindest in bestimmten Bereichen – keine bleibenden Erinnerungen bilden.

Hüter des Gedächtnisses

Bereits 1924 belegten die amerikanischen Psychologen John Jenkins und Karl Dallenbach erstmals den positiven Einfluss des Schlafens auf das Gedächtnis. In ihren fast schon legendären Versuchen ließen sie zwei Studenten zunächst jeweils eine Reihe von sinnlosen Silben auswendig lernen – entweder morgens zwischen acht und zehn Uhr oder abends vor dem Zu-Bett-Gehen. Vier beziehungsweise acht Stunden spä-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

ter überprüften sie dann, was die beiden Versuchsteilnehmer behalten hatten. Das Ergebnis fiel eindeutig aus: Waren die Probanden wach geblieben, konnten sie sich an weniger Silben erinnern, als wenn sie geschlafen hatten.

Andere Forscher bestätigten später diesen positiven Effekt des nächtlichen Schlummers. Jenkins und Dallenbach begründeten ihn mit der »Interferenztheorie des Vergessens«, die schon früher als Erklärung dafür aufgestellt worden war, warum Gedächtnisinhalte mit der Zeit verloren gehen. Dazu muss man wissen, dass jeder Merkvorgang aus drei Schritten besteht. Am Anfang steht das Lernen im eigentlichen Sinn. Hier wird die neu zu speichernde Information – seien es englische Vokabeln oder die sinnlosen Silben aus dem Experiment – in eine neuronale Repräsentation, ein Engramm, umgewandelt. Doch die frischen Gedächtnisspuren, die in dieser so genannten Enkodierungsphase entstehen, sind noch sehr fragil: Sie zerfallen leicht, und dann geht das Wissen verloren. Damit eine Information dauerhaft in Erinnerung bleibt, muss sich das zugehörige Engramm verfestigen.

Diese Konsolidierung beinhaltet zweierlei: die Verstärkung der frischen Gedächtnisspuren und die Integration des neu Erlernten in schon im Langzeitgedächtnis verankerte Inhalte. Erst danach gelingt auch der dritte Schritt: der Abruf der gespeicherten Daten, wenn wir uns – auch nach Wochen oder Monaten noch – an die englischen Vokabeln oder sinnlosen Silben erinnern.

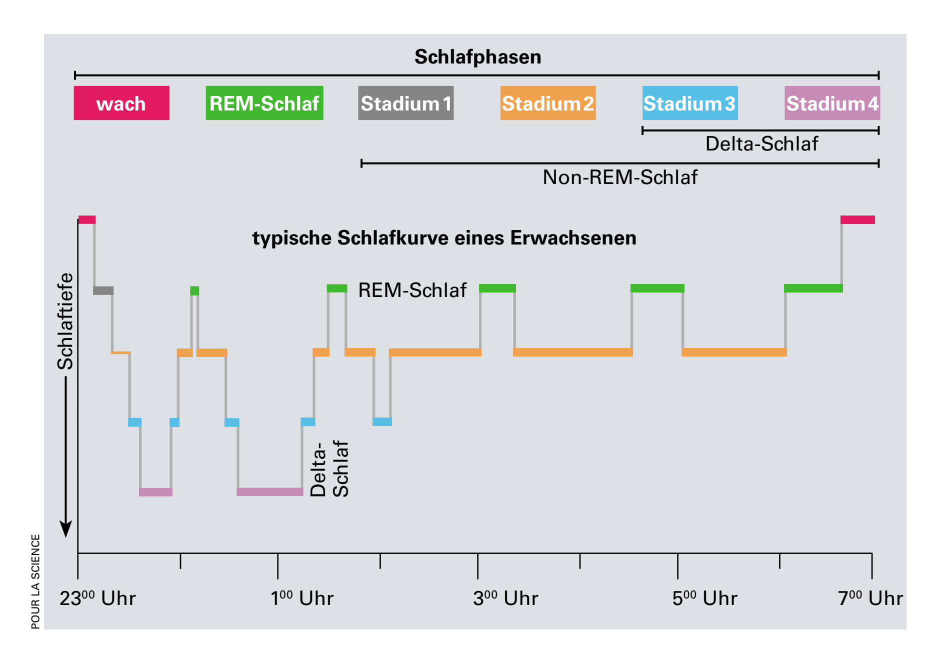
Wachen und Schlafen unterscheiden sich auch in der Hirnstromkurve, die im Tiefschlaf durch hohe, langsame »Delta-Wellen« geprägt ist.

Jenkins und Dallenbach vermuteten, dass der Schlaf das Gedächtnis fördert, weil er die Aufnahme und Enkodierung neuer Inhalte verhindert. Nach ihrer Theorie überlagern die im Wachzustand ▷

permanent auf das Gehirn einströmenden Informationen die empfindlichen frischen Gedächtnisspuren und löschen sie auf diese Weise aus – vor allem, wenn der neue Input dem zuvor Erlernten ähnelt. Da im bewusstlosen Dämmerzustand aber keine weiteren Daten hinzukommen, wird diese »retrograde Interferenz« unterbunden. »Wer schläft, sündigt nicht«, sagt der Volksmund. »Und er vergisst nicht«, ergänzten die beiden Amerikaner, »oder zumindest nicht so viel.«

Obwohl etliche Versuche den von Jenkins und Dallenbach propagierten Zusammenhang zwischen Schlaf und Erinnerungsvermögen grundsätzlich bestätigten, erhoben Kritiker methodische Einwände. Diese beruhten auf einem Kernproblem, das der Gedächtnisforschung bis heute zu schaffen macht. Ob und wie gut ein Proband sich an etwas erinnert, hängt nämlich von allen drei Teilprozessen der Gedächtnisbildung ab: Enkodierung, Konsolidierung und Abruf. Durchaus denkbar also, dass es einem ausgeschlafenen Gehirn einfach leichter fällt, gespeichertes Wissen wieder abzurufen, ohne dass dies irgendetwas mit einer verbesserten oder verstärkten Konsolidierung der betreffenden Gedächtnisinhalte zu tun hat. Umgekehrt muss Vergessen nicht unbedingt auf einem Verfall der Engramme beruhen, also auf einer unterbliebenen Konsolidierung; ebenso könnte der Zugriff auf die neuronale »Festplatte« blockiert sein – vielleicht sogar nur vorübergehend, weil der Geist gerade zu müde ist.

Während der Nacht durchlaufen wir wiederholt verschiedene Schlafstadien. In den ersten Stunden dominiert der Tiefschlaf mit den Delta-Wellen in der Hirnstromkurve. Später überwiegen die traumreichen REM-Phasen (von englisch *rapid eye movements*), die durch rasche Augenbewegungen gekennzeichnet sind.



Virtueller Heimtrainer

Neuronale Gedächtnisspuren lassen sich auch heute noch nicht direkt nachweisen. Trotzdem steht mittlerweile so gut wie außer Zweifel, dass ohne Schlaf bestimmte Gedächtnisprozesse unmöglich wären – insbesondere solche, die zur Bildung länger anhaltender Erinnerungen beitragen. Insofern hatten Jenkins und Dallenbach Recht. Allerdings beruht der Effekt wohl nicht nur darauf, dass während der nächtlichen Ruhepausen die »Inputkanäle« für neue Informationen geschlossen sind, sondern vor allem auf einer aktiven Konsolidierung des tagsüber Erlebten und der dabei erworbenen Fakten und Fähigkeiten.

Die klarsten Belege dafür, dass Schlaf zum Lernen nötig ist, findet man beim so genannten prozeduralen Gedächtnis. Es speichert alles, was mit geistigen oder körperlichen Fertigkeiten *(skills)* zu tun hat, seien sie motorisch oder sensorisch. Wenn wir Ski fahren, Maschine schreiben, Klavier spielen oder einen Pfirsich mit geschlossenen Augen an seiner weichen, pelzigen Haut erkennen, greifen wir auf prozedurales Wissen zurück.

Für diesen Teil des Gedächtnissystems gilt ein manchmal sehr mühsames Prinzip: Nur Übung macht den Meister. Denn die Enkodierung und Speicherung solcher Fertigkeiten erfolgt allmählich – durch wiederholtes Training. Die neuronalen Netzwerke des Neokortex und der Basalganglien, in denen sich das prozedurale Lernen hauptsächlich abspielt, brauchen steten Drill. Dafür wird der Fleißige dann auch belohnt. Die mit Schweiß und Tränen erkauften Fertigkeiten bleiben, einmal erlernt, ein Leben lang im Denkorgan gespeichert. Deshalb können wir, auch wenn wir jahrelang kein Fahrrad mehr gefahren sind, uns jederzeit wieder auf den Drahtesel schwingen und eine Runde drehen, ohne herunter zu fallen. Das geht ganz automatisch, denn der Abruf prozeduraler Fertigkeiten funktioniert implizit: Man muss sich die einzelnen Bewegungselemente nicht ins Bewusstsein rufen.

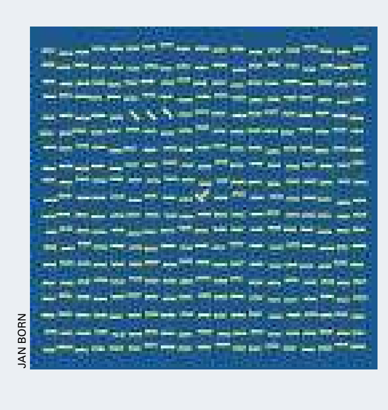
Dieses Gedächtnissystem lässt sich zum Beispiel mit einer Texturdiskriminationsaufgabe testen. Dabei sieht der Proband auf einem Computermonitor ein regelmäßiges Muster aufleuchten, in das eine abweichende Struktur eingebettet ist, also beispielsweise drei schräge inmitten lauter horizontaler Striche (siehe Kasten gegenüber). Um einen solchen Zielreiz zu erkennen, braucht das untrainierte Auge etwa 120 Millisekunden. Erwartungsgemäß verkürzt sich diese Zeitspanne durch fleißiges Üben.

Das Konzept des prozeduralen Gedächtnissystems wurde erst in den 1980er Jahren formuliert. Entsprechend neu sind die frühesten Untersuchungen zur Bedeutung des Schlafs für diese Form der Merkfähigkeit. Eines der ersten Experimente führte Avi Karni vom Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel) 1994 durch. Er ließ seine Probanden Texturdiskriminationsaufgaben lösen und maß ihre Antwortzeiten nach durchschlafener Nacht noch einmal. Dabei erlebte er eine Überraschung. Die Versuchspersonen hatten nicht nur ihr tags zuvor erreichtes Niveau gehalten, sondern sich sogar gesteigert: Sie erkannten die Zielreize jetzt deutlich rascher als unmittelbar nach der Lernphase. Offenbar hatte das Gehirn die verstrichene Zeit genutzt, um heimlich, still und leise weiterzuüben.

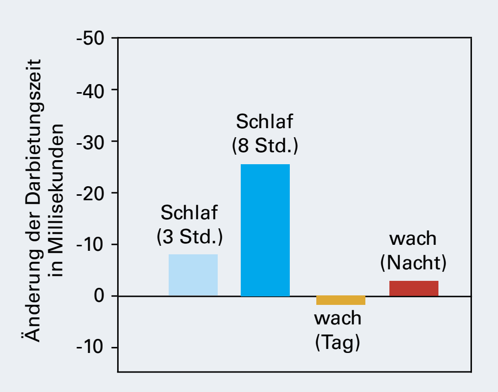
Demnach lässt der Konsolidierungsprozess nach dem Ende des Trainings also nicht nur das neu Erlernte dauerhaft

Texturdiskriminationsaufgabe

Mit Texturdiskriminationsaufgaben lässt sich das prozedurale Gedächtnis testen, das für das Erlernen sensorischer oder motorischer Fertigkeiten zuständig ist. Im gezeigten Beispiel gilt es zu erkennen, ob der mehr oder weniger gedrehte Buchstabe in der Bildmitte ein T oder L ist, und zugleich festzustellen, ob die drei diagonalen Striche über- oder nebeneinander stehen (Zieltextur). Im Test wird das Muster immer kürzer dargeboten und ermittelt, ab wann die Probanden die Zieltextur nicht mehr erkennen. Durch Üben verbessert sich die Leistung. Anschließender Schlaf bewirkt je nach seiner Dauer eine weitere Steigerung, während Wachbleiben – am Tag oder über Nacht – keinen Effekt hat.



JAN BORN



ins prozedurale Gedächtnis einsickern, sondern verbessert die frisch erworbenen Fähigkeiten sogar noch. Zunächst dachte man, dieses offline ablaufende »langsame latente Lernen« sei nur eine Frage der Zeit: Bis sich der Lerneffekt stabilisiert habe und dies sich im Testergebnis niederschlüge, müssten einfach ein paar Stunden verstreichen.

Zeitfenster für den Lerneffekt

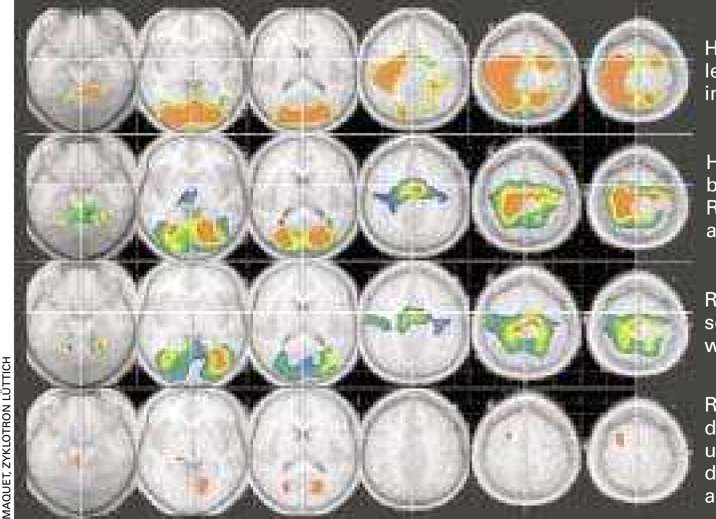
Wie sich zeigte, stimmt diese Annahme aber nur zum Teil. Der entscheidende Punkt ist, wie man die Zeit nach dem Training verbringt. Bleiben die Probanden wach, stagnieren ihre Leistungen beim Diskriminationstest oder verschlechtern sich sogar. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Abruf nach drei oder zwölf Stunden erfolgt. Anders das Bild, wenn die Versuchsteilnehmer am Tag üben und die folgende Nacht durchschlafen. Dann ist ihr Leistungsvermögen am nächsten Morgen deutlich gestiegen, und sie behalten dieses Niveau auch Tage und Wochen nach der Trainingseinheit bei.

Das langsame latente Lernen findet also nur im Schlaf statt. Dabei sind die ersten 24 Stunden von entscheidender Bedeutung. Das zeigten Versuche von Robert Stickgold und seinem Team an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Die Wissenschaftler ließen ihre Probanden morgens die visuelle Diskriminationsaufgabe trainieren und hielten sie bis zum nächsten Morgen wach. Damit verhinderten sie, wie zu erwarten, den Lerneffekt. Aber auch nachdem die Versuchsteilnehmer in den folgenden drei Nächten den versäumten Schlaf ausgiebigst nachgeholt hatten, blieb die Gedächtnisbildung mangelhaft: Das anfängliche Defizit ließ sich nicht mehr kompensieren.

Stickgold konnte zudem die von Jenkins und Dallmann vertretene Interferenztheorie widerlegen, indem er seinen Probanden nach dem Üben der Diskriminationsaufgabe zwar wach hielt, ihnen aber die Augen verband. Obwohl jetzt der visuelle Input fehlte, der die frischen Gedächtnisspuren hätte überlagern können, blieb das langsame latente Lernen aus.

Mittlerweile ist nachgewiesen, dass Schlaf dem prozeduralen Gedächtnis nicht nur bei sensorischen Aufgaben auf die Sprünge hilft. So bewältigen Versuchspersonen zuvor trainierte Sequenzen von Fingerbewegungen nach einer ungestörten Nachtruhe deutlich schneller und genauer als ihre unausgeschlafenen Mitprobanden. Demnach erreicht der Mensch bei motorischen Fertigkeiten nur dann substanzielle Leistungszuwächse als Ausdruck der Gedächtnisbildung, wenn er binnen Tagesfrist nach dem Üben schläft. Wer also in einen Skikurs oder eine Fahrstunde investiert, sollte anschließend nicht die Nacht durchfeiern, sonst hätte er sich das Geld sparen können. Notorischen Nachtschwärmern zum Trost sei allerdings gesagt, dass auch ein neunzigminütiges Nickerchen schon eine gewisse Konsolidie- ▷

Per Positronen-Emissionstomografie testete Pierre Maquet am Zyklotron in Lüttich die Hirnaktivität von Versuchspersonen bei einem Reaktionstest, der auf das prozedurale Gedächtnis zurückgreift. Im anschließenden REM-Schlaf zeigten sich sehr ähnliche zentralnervöse Erregungsmuster. Anscheinend spielte das Gehirn das Gelernte im Traum teilweise noch einmal durch.



Hirnregionen, die bei den lernenden Versuchspersonen im Wachzustand aktiv waren

Hirnregionen, die bei denselben Personen dann nachts im REM-Schlaf (Traumschlaf) aktiv waren

Regionen, die bei Kontrollpersonen im REM-Schlaf aktiv waren

Regionen, die beim Ausführen der Aufgabe benötigt werden und die im REM-Schlaf bei den Trainierenden aktiver sind als bei den Untrainierten

P. MAQUET, ZYKLOTRON LÜTTICH

rung mit sich bringt – notfalls reicht also ein kurzer Mittagsschlaf.

Diese Versuchsergebnisse decken sich mit Erfahrungen, die wohl jeder schon einmal gemacht hat. Am Tag übt man einen schnellen Lauf auf dem Klavier oder die komplizierten Betonungen der Worte einer Fremdsprache; doch je mehr man sich müht, desto schlechter scheint es zu klappen. Man legt sich frustriert ins Bett und – pling! – am nächsten Morgen geht auf wundersame Weise alles wie von selbst.

Daniel Margoliash von der Universität Chicago hat diesen Effekt auch im akustischen Bereich nachgewiesen. In der Frühe trainierte er eine Gruppe von Studenten darauf, die verzerrten und entstellten Laute einer Computerstimme zu verstehen. Beim eigentlichen Test sollten die Probanden dann möglichst viele andere Worte der künstlichen Sprache erkennen.

Direkt nach der Übungsphase zeigte sich ein deutlicher Lerneffekt: Die Trefferquote war um durchschnittlich 21 Prozent gestiegen. Doch als der Neurobiologe seine Eleven abends erneut testete, schienen sie das Gelernte schon fast wieder vergessen zu haben: Ihre Leistungen waren nur noch zehn Prozent besser als vor dem Training. Ein achtstündiger Schlummer brachte die »Sprachkenntnisse« allerdings zurück. Am nächsten Morgen identifizierten Margoliashs Probanden die verzerrten Begriffe so sicher wie unmittelbar nach der Übungseinheit. Die Nachtruhe hatte das verblassende Wissen offenbar vor dem Vergessen bewahrt und die bereits verloren geglaubten Erinnerungen ins Gedächtnis zurückgeholt.

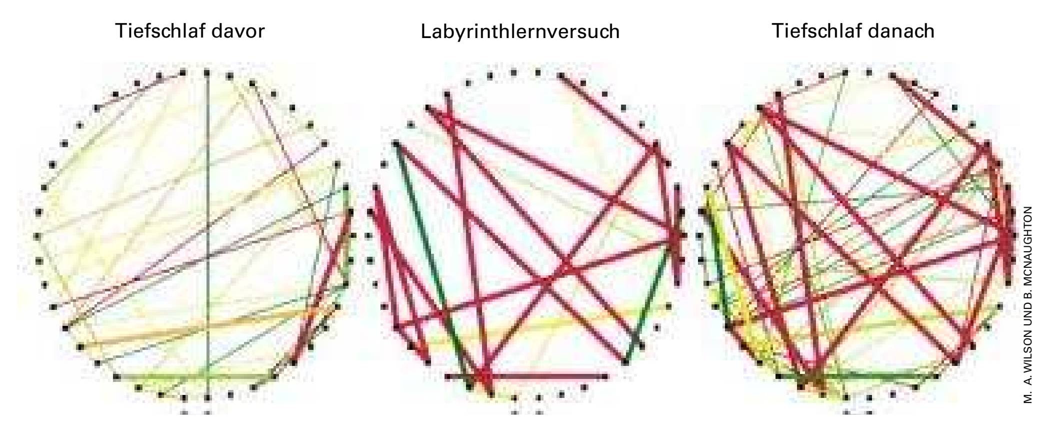
Der Zusammenhang zwischen Schlaf und prozeduralen Erinnerungsprozessen ist also gut belegt. Ungleich schwieriger gestaltet sich die Beweisführung dagegen beim deklarativen Gedächtnis. Es umfasst all jene Dinge, die wir typischerweise mit dem Begriff Gedächtnis verbinden: Vokabeln einer Fremdsprache lernen, ein Leben lang wissen, dass die Hauptstadt von Italien Rom heißt, oder sich daran erinnern, wie man als Kleinkind auf dem Spielplatz den Lieblingsteddy verloren hat. Das deklarative System speichert sowohl Fakten als auch Dinge, die wir selbst erlebt haben. Es beherbergt also unser Wissen über die Welt und unsere persönliche Biografie.

Dialog zweier Hirnregionen

Um die Wirkung des Schlafs auf das deklarative Gedächtnis zu testen, lässt man Probanden zum Beispiel kurze Geschichten oder Wortpaare lernen – was Forscher bis in die 1980er Jahre hinein auch ausgiebig praktizierten. Die Ergebnisse waren uneinheitlich: Zwar konnten sich ausgeschlafene Versuchsteilnehmer in aller Regel besser an das Gelernte erinnern als solche, die wach geblieben waren. Beim erneuten Abruftest nach einer Woche mit normalem Schlafrhythmus zeigten sie aber genauso deutliche Gedächtnislücken wie jene Probanden, die im Anschluss an die Lernphase 24 Stunden lang kein Auge zugedrückt hatten. Schlaf scheint deklarative Lernprozesse also zwar kurzfristig zu fördern, den direkten Beweis eines lang anhaltenden Gedächtniseffekts blieben all diese Studien jedoch schuldig. Das gilt bis heute.

Der Grund dafür ist sehr wahrscheinlich ein spezifisches Charakteristikum dieses Gedächtnissystems: Deklaratives Lernen braucht Zeit! Vermutlich dauert es eine Weile, die neu aufgenommenen Informationen in bereits im Langzeitgedächtnis gespeicherte Inhalte zu integrieren. Damit sich bleibende Erinnerungen bilden können, enkodiert das Gehirn den frischen Input im deklarativen Gedächtnis zweifach: in den Neuronennetzen des Hippokampus (»Seepferdchens«) am unteren Rand der Hirnrinde und zusätzlich im Neokortex, dem oberen, evolutionsbiologisch jungen Teil des Gehirns. Nach der gängigen Theorie, die vor allem auf Tierexperimenten und Beobachtungen an Patienten mit Hirnschädigungen basiert, dient der Hippokampus dem deklarativen Gedächtnis als eine Art Puffer zwischen der Datenflut, die im Gehirn ankommt, und dem kleinen Teil davon, der wichtig genug erscheint, länger erhalten zu bleiben. Hier werden Informationen, Erfahrungen, Eindrücke, Erlebnisse – beispielsweise die englischen Vokabeln – erst einmal zwischengelagert, ehe sie nach gründlichem Aussieben in den Langzeitspeicher gelangen.

Deklarative Lernprozesse laufen extrem schnell ab. Anders als beim prozeduralen Gedächtnis reicht dem Hippokampus schon die einmalige Konfrontation mit einem Ereignis, um eine dauerhafte Gedächtnisspur zu bilden. Das erscheint sinnvoll – schließlich erleben wir die wenigsten Situationen im Leben zweimal in exakt derselben Form. Dafür zerfallen diese Gedächtnisspuren aber auch rasch, weil der »Zwischenspeicher« nur eine begrenzte Kapazität hat. Die Folge heißt Vergessen. Dass wir uns trotzdem auch im Greisenalter noch an unser erstes Rendezvous erinnern, verdanken wir einem langsamen Lernvorgang, der gleichzeitig im Hintergrund abläuft und der dem langsamen latenten Lernen des prozeduralen Systems ähnelt. Dabei werden die im Hippokampus abgelegten neuronalen Repräsentationen in den Neokortex übertragen und dort ins Langzeitgedächtnis integriert.

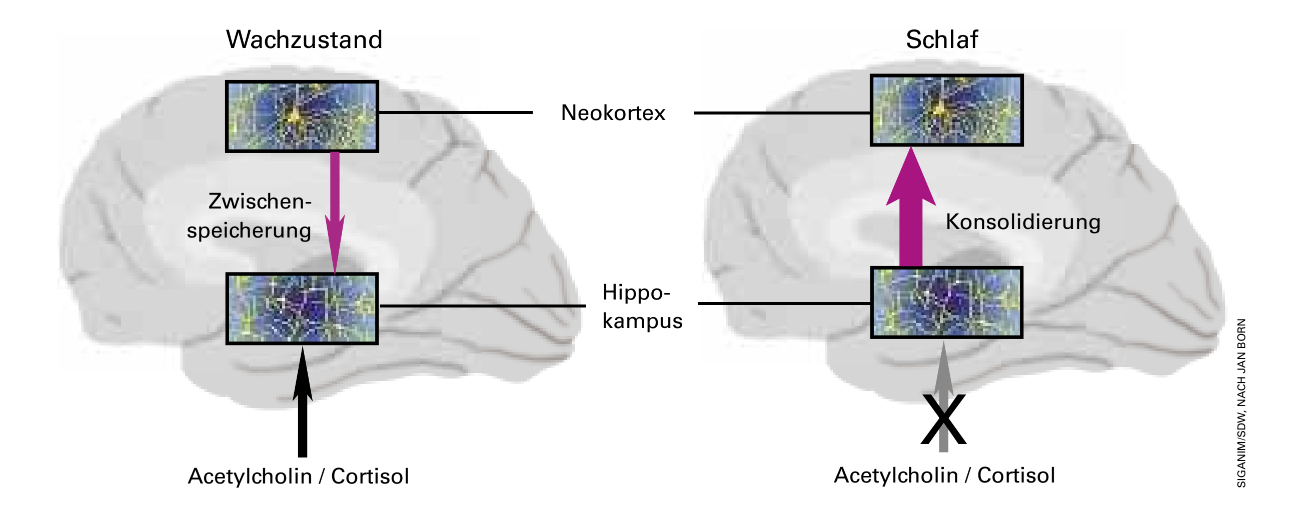


M. A. WILSON UND B. MCNAUGHTON

Das Korrelationsmuster zwischen der Aktivität von 42 Neuronen im Hippokampus von Ratten bei einem Lernversuch im Labyrinth gleicht dem im Tiefschlaf danach, aber nicht davor. Offenbar werden neuronale Erregungsmuster aus dem Versuch im folgenden Schlaf reproduziert. Schwache Korrelationen sind grün, starke rot gezeichnet, und solche, die außer beim Labyrinthlernen auch in einer der beiden Tiefschlafphasen auftraten, durch dicke Striche wiedergegeben.

Die Verfestigung von Erinnerungen

Der Hippokampus, eine Region am unteren Rand der Hirnrinde, dient nach heutigem Wissensstand als Zwischenspeicher für neu erworbenes Wissen sowie Erfahrungen und Erlebnisse am Tag. Beim Schlafen werden die frischen Informationen dann selektiv in den Neokortex zurückgespielt und dort im Langzeitgedächtnis integriert. Bei diesem Vorgang – der so genannten Konsolidierung – würde frischer sensorischer Input stören. Deshalb kann er nur bei ausgeschaltetem Bewusstsein ablaufen. Neurotransmitter wie Acetylcholin und Stresshormone wie Cortisol unterdrücken das Überspielen der Informationen ins Langzeitgedächtnis am Tag. Im nächtlichen Schlaf ist ihr Spiegel dagegen abgesenkt.



Erst nach dieser aktiven Konsolidierung können wir auf die gespeicherten Fakten und Ereignisse unabhängig vom hippokampalen System zugreifen. Doch die Verfestigung dauert in der Regel Tage bis Wochen. Genau das macht es so schwierig nachzuweisen, dass auch das deklarative Gedächtnis Schlaf braucht, um bleibende Erinnerungen zu bilden. Denn gerade in der ersten Zeit, nachdem wir etwa Wortpaare gelernt haben, dominiert der schnelle Zerfall der betreffenden Gedächtnisspuren über das wesentlich langsamer ablaufende latente Lernen. Testet man dann am nächsten Tag den Abruf, lässt sich folglich kein Lerneffekt feststellen. Im Gegenteil: Da die Probanden in erster Linie vergessen, verschlechtern sich ihre Leistungen zwangsläufig – unabhängig davon, ob sie in der Zwischenzeit geschlafen haben oder nicht.

Andererseits ist ein 24-stündiger Schlafentzug unter diesen Umständen auch nicht so tragisch. Wenn sich die Bildung dauerhafter Erinnerungen über viele Tage erstreckt, kann das Versäumte in den nächsten Nächten nachgeholt werden.

Für den endgültigen Beweis, dass außer sensorischen und motorischen Fähigkeiten auch Fakten und Ereignisse nur bei ausreichend Schlaf den Weg ins Langzeitgedächtnis finden, müsste man die Probanden also mindestens eine Woche lang wach halten. Ein Ding der Unmöglichkeit. Spätestens nach drei Tagen wären die Versuchsteilnehmer mit den Nerven am Ende und könnten sich vor Müdigkeit wohl nicht einmal mehr an ihren Geburtstag erinnern.

Trotzdem gibt es eine ganze Reihe indirekter Belege dafür, dass Schlaf auch die deklarative Gedächtnisbildung fördert. Die meisten beruhen auf Untersuchungen direkt am Gehirn und betreffen die neuronalen Mechanismen des Merkvorgangs.

Spiel's noch einmal, Sam – aber nur im Schlaf

Aufschlussreich waren vor allem Rattenexperimente, die Matthew A. Wilson vom Massachusetts Institute of Technology und Bruce McNaughton von der Universität von Arizona in Tuscon durchführten; denn auch Tiere lernen deklarativ mit Hilfe des Hippokampus. Die beiden Wissenschaftler trainierten die Nager darauf, in einem Labyrinth den richtigen Weg zu einer Futterstelle zu finden. Gleichzeitig leiteten sie mit Elektroden die Aktivität der so genannten Ortszellen *(place cells)* im Hippokampus ab. Diese Neuronen dienen der Orientierung und repräsentieren gemeinsam jede Position der Ratte im Raum. Läuft das Tier zum Futter, entsteht für die gewählte Route ein spezifisches räumlich-zeitliches Erregungsmuster – der Weg wird als Sequenz feuernder Ortszellen enkodiert.

Nach der Lernphase durften die Ratten schlafen. Wilson und McNaughton dagegen blieben wach und fuhren fort, die Hirnströme der Tiere zu messen. Dabei machten sie eine frappierende Entdeckung: Exakt die hippokampalen Erregungsmuster, die sie am Tag beobachtet hatten, durchzuckten nun erneut das Gehirn der schlummernden Nager – als hätte jemand die Replay-Taste gedrückt. »Die Ratte wanderte im Schlaf noch einmal durch das Labyrinth. Es fehlte nur die Bewegung der Gliedmaßen«, fasste Wilson das Ergebnis zusammen.

Die deklarative Gedächtnisbildung scheint somit darauf zu beruhen, dass der »Film«, den wir tagsüber erleben, nachts im Kopf ein zweites Mal abläuft. Im Wachzustand speisen wir eine Fülle von Informationen ins Gehirn ein, die der Hippokampus in Form von spezifi- ▷

▷ schen Aktivitätsmustern eines Nervenzell-Ensembles enkodiert. Diese Muster werden im Schlaf erneut aufgerufen – allerdings unterschwellig, was erklärt, warum die Signale nicht dieselben Sinneseindrücke und Reaktionen auslösen wie beim Enkodieren. Der Hippokampus schickt die reaktivierte Information dann an die Großhirnrinde zur dauerhaften Speicherung. Erst nach diesem Transfer in den Neokortex bleiben Fakten und Ereignisse langfristig im Denkorgan haften.

Da drängt sich natürlich sofort die Vermutung auf, dass Träume etwas mit diesem Konsolidierungsprozess zu tun haben. Schließlich sehen die nächtlichen Traumbilder den Erlebnissen der vergangenen Tage oft verblüffend ähnlich.

Zumindest für das deklarative Lernen trifft diese von vielen Forschern lange vertretene These aber wohl nicht zu. Wie verschiedene Studien ergaben, kommt es bei diesem Teil des Gedächtnisses in erster Linie auf den – in der Regel eher traumlosen – Tiefschlaf an. Er ist durch hohe, langsame Hirnstromwellen, die so genannten Delta-Wellen, charakterisiert und tritt vor allem in der ersten Nachthälfte auf (siehe Kasten auf S. 46). In solchen Delta-Abschnitten beobachteten 1994 auch Wilson und McNaughton die hippokampale Reaktivierung im Gehirn ihrer Versuchsratten.

Vom traumreichen REM-Schlaf hingegen scheint vor allem das prozedurale System zu profitieren. Das geht so weit, dass sich der Anteil der REM-Phasen bei den Versuchspersonen nach dem Training erhöht. Dennoch: Ohne Tiefschlaf funktioniert Gedächtnisbildung generell nicht, er setzt den Prozess in Gang. Der Traumschlaf fügt der Erinnerung dann weitere Komponenten hinzu, etwa eine gewisse emotionale Tönung (nebenstehender Kasten).

Wozu wir den Schlummer brauchen

Die Gedächtnis bildende Funktion des »Matratzehorchens« gibt auch eine Antwort auf die eingangs gestellte Kernfrage: Warum dämmert der Mensch jede Nacht aufs Neue einige Stunden wehr- und bewusstlos vor sich hin, anstatt wachen Geistes auszuruhen? Die Reaktivierungsprozesse im Hippokampus und die Übertragung der Inhalte in den Neokortex können nur ungestört ablaufen, wenn das Gehirn »offline« ist. Dieselben neuronalen Netze, die im Wachzustand sämtliche eintreffenden Informationen verarbeiten, werden nämlich auch für die dauerhafte Speicherung dieser Daten benutzt. Da die Neuronenverbände aber nicht gleichzeitig den aktuellen Input aufbereiten und frisch enkodierte Gedächtnisinhalte mittels Replay-Mechanismus verfestigen können, findet die Konsolidierung unter Ausschluss der bewussten Reizverarbeitung statt – und diesen Zustand erreicht der gesunde Körper ausschließlich im Schlaf.

Noch ist dieses Modell der Gedächtnisbildung hypothetisch. Zumindest beim Menschen, dem man ja nicht einfach Elektroden ins Gehirn implantieren kann, fehlt der direkte Nachweis der entsprechenden neuronalen Prozesse. Dass insbesondere der Delta-Schlaf für erfolgreiches deklaratives Lernen wichtig ist, belegen aber auch neurochemische Experimente, die einer von uns (Born) und seine Mitarbeiter an der Universität Lübeck durchgeführt haben.

Dabei spielt unter anderem das Stresshormon Cortisol eine interessante Rolle. Dieser Botenstoff scheint die Sig-

Irrtum, Herr Freud

»Schlaf eine Nacht drüber, morgen siehst du alles gelassener.« Angesichts von Liebeskummer oder verpatzter Prüfung ein wohlgemeinter Rat, doch sehr wahrscheinlich ein falscher. Denn Schlaf scheint die Erinnerung an emotionale Erlebnisse noch zu steigern. Zeigt man Testpersonen am Abend aufwühlende Bilder, empfinden sie diese am nächsten Morgen emotionsgeladener; aversive Gefühle wie Abneigung oder Ekel intensivieren sich. Vor allem während der traumreichen REM-Phasen werden deklarative Gedächtnisinhalte offenbar emotional eingefärbt.

Dieses Ergebnis widerlegt die These Sigmund Freuds, nach der Träume eine Art Katharsis bewirken, die den Geist von quälenden Gefühlen befreit. Dass REM-Schlaf die emotionale Gedächtnisbildung verstärkt, könnte außerdem erklären, warum sich bei depressiven Patienten nach Schlafentzug – insbesondere wenn er selektiv die REM-Phasen betrifft – oft die Stimmung verbessert.

nalübertragung aus dem »Zwischenspeicher« zum Neokortex zu unterdrücken. Delta-Schlaf hemmt die Cortisolfreisetzung und schafft so günstige Voraussetzungen, um die Kommunikation zwischen den beiden Hirnregionen, die dem Erinnerungsvermögen so zuträglich ist, ungestört ablaufen zu lassen. Und tatsächlich: Spritzt man Probanden in der frühen Phase ihres Nachtschlafs geringe Mengen Cortisol, blockiert das die deklarative Gedächtnisbildung (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1998, S. 21).

Wer nach dem Büffeln schlummert, gibt dem Lernstoff also Gelegenheit, sich dauerhaft in die Gehirnwindungen einzugraben. Doch damit nicht genug: Er kann sogar darauf hoffen, am nächsten Morgen schlauer aufzuwachen.

Quell der Kreativität

Wie eine an der Universität Lübeck durchgeführte Studie zeigt, stellt sich die Lösung eines komplexen Problems nämlich manchmal ganz von selbst ein, wenn man eine altbekannte Volksweisheit befolgt und erst einmal eine Nacht darüber schläft. Die 66 Probanden mussten nach zwei Regeln aus einer vorgegebenen Zahlenreihe eine neue Ziffernfolge ableiten. Deren letzte Ziffer war als Lösung in den Computer einzugeben. Was den Versuchsteilnehmern verheimlicht wurde: Es gab eine versteckte dritte Regel, mit der sich das Endergebnis sehr viel leichter und schneller finden ließ (siehe Kasten rechts oben).

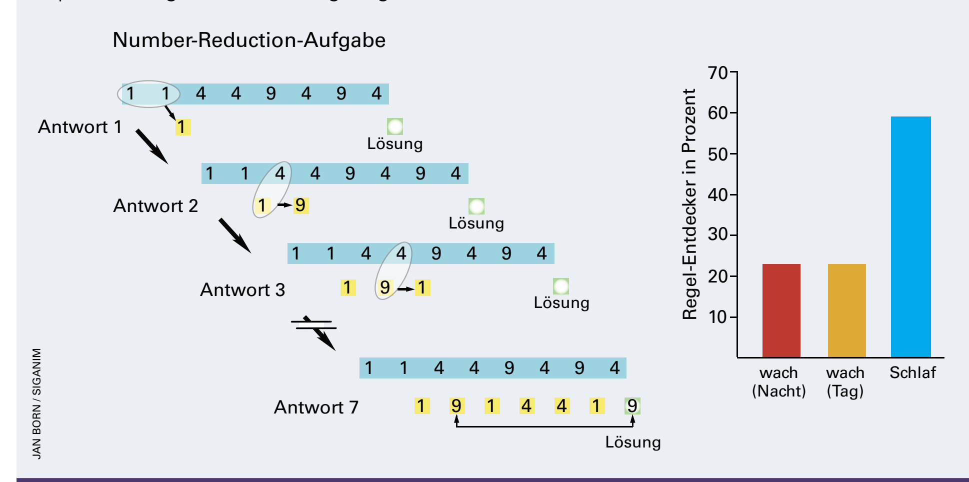
Im ersten Durchgang bearbeiteten die Probanden jeweils neunzig Zahlenreihen, wofür sie im Durchschnitt etwa zwanzig Minuten benötigten. Dabei stieß kaum einer auf die verborgene Struktur. Dann wurde das Experiment unterbrochen. Eine Gruppe durfte sich acht Stunden aufs Ohr hauen, die andere blieb in dieser Zeit wach. Morgens um sieben hieß es: »Ab in die zweite Runde!« Alle Testpersonen mussten weitere 300 Ziffernkolonnen durchackern. Nun zeigten sich die Ausgeschlafenen deutlich aufgeweckter: Rund sechzig Prozent von ihnen entdeckten im Lauf der Bearbeitung die versteckte Abkürzung. Unter den Wachgebliebenen fanden nur 23 Prozent den geheimen Kniff.

Waren sie schlicht zu müde, um die Kopfnuss zu knacken? Nein, denn eine zum Vergleich herangezogene dritte Gruppe, die morgens trainierte und nach einer achtstündigen Pause am Abend den zweiten Durchgang absolvierte, schnitt genauso schlecht ab. Offenbar fanden die schlafenden Probanden die tiefere Einsicht tatsächlich im Kissen. So wie einige Berühmtheiten vor ihnen. Dem russischen Chemiker Dimitri Mendelejew soll die entscheidende Idee für das Periodensystem der Elemente gekommen sein, als er erschöpft vom erfolglosen Nachdenken einnickte. Und auch Friedrich August Kekulé berichtete, dass er vor dem Kaminfeuer einschlief und mit der lange gesuchten Struktur des Benzols im Kopf wieder aufwachte.

Der Versuch mit den Zahlenreihen belegt, dass Schlaf neue Gedächtnisspuren nicht nur verfestigt, sondern auch qualitativ verändert. Wenn nachts die tagsüber gesammelten Erfahrungen vom Hippokampus in den Langzeitspeicher im Neokortex überspielt und mit dort schon vorhandenen Inhalten verknüpft werden, kann es offenbar zu einer Umorganisation des frisch erworbenen Wissens kommen. Diese Restrukturierung eröffnet dann plötzlich ganz neue Einsichten. Wer Schlafmützen als Faulpelze beschimpft, tut ihnen also bitteres Unrecht; denn sie machen sich nur zu Nutze, dass das Gehirn beim Pennen, Pofen, Heiamachen emsig weiter an der Lösung anstehender Probleme arbeitet. Nicht nur den Seinen gibt es der Herr im Schlaf. ◁

Geheimpfad zur Lösung

Bei der Number-Reduction-Aufgabe bearbeitet der Proband vorgegebene Reihen mit nur drei verschiedenen Zahlen (1, 4 und 9) nach zwei Regeln. Folgen zwei gleiche Ziffern aufeinander, ist die Antwort eben diese Ziffer (1 und 1 ergibt 1). Sind die beiden bearbeiteten Zahlen dagegen verschieden, werden sie durch die verbliebene, dritte Ziffer aus der dreielementigen Menge ersetzt (1 und 4 ergibt 9). Die Antwort aus dem ersten Zahlenpaar (1) verrechnet der Proband dann mit der nächsten Ziffer in der Reihe (4) und so weiter. Dieses sequenzielle Vorgehen führt ihn in sieben Rechenschritten zur Lösung. Was die Testperson nicht weiß: Alle Zahlenreihen sind so aufgebaut, dass die zweite Antwort (hier 9) bereits das Endergebnis voraussagt. Erkennt der Proband diese versteckte Regel, kann er sich die restlichen fünf Schritte sparen und gleich die Lösung eingeben.





Jan Born ist Direktor des Instituts für Neuroendokrinologie an der Universität Lübeck und erforscht dort die Zusammenhänge zwischen Schlaf und Gedächtnis. **Ulrich Kraft** ist Mediziner und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Warum wir schlafen. Von Jerome M. Siegel, in: Spektrum der Wissenschaft 1/2004, S. 30

Sleep inspires insight. Von Ullrich Wagner et al., in: Nature, Bd.427, S. 352 (2004)

Sleep, learning, and dreams: offline memory processing. Von Robert Stickgold et al., in: Science, Bd. 294, S. 1052 (2001)

Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. Von Werner Plihal und Jan Born, in: Journal of Cognitive Neuroscience, Bd. 9, S. 534 (1997)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Der geschmiedete Himmel

Die 3600 Jahre alte Himmelsscheibe von Nebra gilt als älteste konkrete Darstellung der Gestirne. Sie wirft ein neues Licht auf astronomisches Wissen und Weltbilder der Bronzezeit-Menschen.

Von Uwe Reichert

Freude und Stolz stehen Harald Meller ins Gesicht geschrieben. Eineinhalb Jahre, nachdem der Leiter des Landesamts für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt in Halle erstmals den pizzatellergroßen Gegenstand in Händen hielt, kann er die »Himmelsscheibe von Nebra« in voller Pracht der Öffentlichkeit präsentieren. Rund 3600 Jahre lang lag die Bronzescheibe in der Erde, bevor Raubgräber sie im Sommer 1999 unsachgemäß dem Boden entrissen und illegal verhökerten. Inzwischen ist der Sensationsfund fachgerecht restauriert und zentrales Schmuckstück der Ausstellung »Der geschmiedete Himmel«, die den Besuchern die Welt der Bronzezeit in Mitteleuropa näher bringt.

Als sie ihm zum Kauf angeboten wurde, hatte der Archäologe Meller die Bedeutung der Bronzescheibe sofort erkannt. Goldverzierungen stellten offenbar Sonne, Mond und Sterne dar – ein solch konkretes Abbild des Himmels, mutmaßlich in prähistorischer Zeit gefertigt, war den Forschern bislang nicht bekannt gewesen. Die Raubgräber indes hatten den wissenschaftlichen Wert ihres Funds nicht zu würdigen vermocht: Sie hielten ihn anfangs für einen alten Eimerdeckel. Während der Bergung mit einem Zimmererhammer beschädigten sie den Rand der Scheibe und rissen Stücke der Goldornamente ab. Ein Aufkäufer versuchte, die fest anhaftenden Erdreste zu entfernen, indem er die Scheibe in einem Wasserbad einweichte und anschließend mit Zahnbürste und Stahlwolle bearbeitete. Dabei zerkratzte er die gesamte Oberfläche der Goldauflagen.

Echt oder gefälscht?

Gemeinsam mit der Scheibe hatten die Raubgräber zwei Schwerter, zwei Beile, einen Meißel und mehrere Bruchstücke von Armreifen aus der Erde geholt (siehe Bild auf S. 54). In einem ungewöhnlichen Ermittlungsverfahren gelang es der Polizei im Februar 2002, diese Bronzegegenstände sicherzustellen und dem rechtmäßigen Eigentümer, dem Land Sachsen-Anhalt, auszuhändigen.

IN KÜRZE

- Die so genannte **Himmelsscheibe von Nebra** gehört zu den sensationellsten archäologischen Funden der letzten Jahre.
- Sie ist der erste Beleg, dass die **bronzezeitlichen Menschen** in Mitteleuropa konkrete Vorstellungen von der Welt der Gestirne hatten.
- Die derzeit favorisierte Deutung der Himmelsscheibe verknüpft **astronomische Phänomene** mit Stichtagen des bäuerlichen Jahres.

Dem Kriminalfall folgte nun ein nicht minder spektakulärer Wissenschaftskrimi. Die Archäologen standen vor der schwierigen Aufgabe, die Echtheit des Funds zu bestätigen, den genauen Fundort zu ermitteln, die Fundumstände zu rekonstruieren, die Herstellungstechnik zu analysieren und schließlich Sinn und Zweck der Scheibe und ihrer Beifunde zu enträtseln. Unterstützung fanden sie dabei bei zahlreichen Kollegen aus natur- und materialwissenschaftlichen Disziplinen, die mit hochmodernen Messverfahren die Geheimnisse der Himmelsscheibe enträtselten.

Streng genommen lässt sich die Echtheit eines archäologischen Fundstücks, das aus einer Raubgrabung stammt, nicht beweisen. Die Wissenschaftler können nur nach Indizien für eine Fälschung suchen und bei deren Ausbleiben eine Imitation mit gewisser Wahrscheinlichkeit ausschließen. Als echt gilt ein Objekt, wenn sein archäologisches Alter – bewertet nach verwendeten Materialien, angewandtem Herstellungsverfahren und Stilvergleichen – mit einer naturwissenschaftlich ermittelten Altersangabe übereinstimmt. Doch wie bestimmt man das Alter eines metallischen Gegenstands? Etablierte archäometrische Verfahren wie die Radiokohlenstoffmethode oder die Thermolumineszenz lassen sich nur auf organische beziehungsweise steinerne Artefakte anwenden.

Wissenschaftler im Forschungszentrum Rossendorf entnahmen aus dem Innern der Himmelsscheibe eine kleine

Die Himmelsscheibe von Nebra – hier nach ihrer Restaurierung – ist weltweit ohne Parallele. Die Deutung ihrer Bildaussage und ihr möglicher Gebrauch stellen Archäologen und Astronomen vor eine große Herausforderung.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Metallprobe und stellten sie der Bergakademie Freiberg zur Verfügung. Dort hatten der Archäometallurg Ernst Pernicka und seine Mitarbeiter einen Test entwickelt, mit dem sich alte und neue Metalle unterscheiden lassen.

Metalle wie Kupfer, Blei, Silber und Zinn, die im Altertum gebräuchlich waren, enthalten unmittelbar nach ihrer Verhüttung geringe Mengen des radioaktiven Isotops Blei-210. Ursächlich dafür ist das im Erz vorhandene Spurenelement Radium, das sich über eine Reihe von Tochterelementen in Blei umwandelt. Während das Radium bei der Verhüttung in der Schlacke zurückbleibt, geht Blei-210 in die Metallschmelze über. Nun ohne Nachschub durch die übergeordnete Zerfallsreihe, nimmt der Gehalt an Blei-210 im Metall mit einer Halbwertszeit von 22,3 Jahren ab. Je nach Anfangskonzentration ist es anhand seiner radioaktiven Strahlung noch etwa 100 bis 300 Jahre nach der Verhüttung nachzuweisen, bevor sein Gehalt unter die Nachweisgrenze sinkt.

Da das Pernicka-Team keine Blei-210-Aktivität in der Bronze der Himmelsscheibe fand, ist diese mit Sicherheit älter als hundert Jahre. Zusammen mit der chemischen Zusammensetzung der Metalle, der Herstellungstechnik der Scheibe sowie der Struktur und der mineralogischen Zusammensetzung der Korrosionsschicht konnte eine Fälschung ausgeschlossen werden.

Schwerter verraten das Alter

Wissenschaftler des Landeskriminalamts Sachsen-Anhalt und des Landesamts für Denkmalpflege und Archäologie untersuchten die an der Scheibe, den Schwertern und den Beilen anhaftenden Bodenreste; diese stimmten mit dem Boden der von den Raubgräbern genannten Fundstelle, die in einer vorgeschichtlichen Wallanlage liegt, überein. Damit stand zweifelsfrei fest, dass alle besagten Teile aus der gleichen Raubgrabung am Mittelberg bei Nebra stammen. Ein weiterer Beleg für die Zusammengehörigkeit der Bronzestücke ist die Ähnlichkeit des verarbeiteten Materials. Denn alle Bronzeteile erwiesen sich als chemisch homogen, aber radioisotopisch inhomogen. Das heißt: Das für die Bronze verwendete Kupfer weist in allen Nebra-Funden ähnliche Konzentrationen von Spurenelementen auf, variiert aber relativ stark hinsichtlich des Gehalts an den verschiedenen Bleiisotopen.

Die Datierung der Himmelsscheibe in prähistorische Zeit erfolgte schließlich mit Hilfe der Beifunde, deren archäologisches Alter leicht ermittelt werden konnte. Denn die Schwerter und Beile lassen sich mit anderen Funden vergleichen und anhand ihrer Form und ihres Stils zeitlich einordnen. In der Regel betrug die Umlaufzeit solcher Zeremonialwaffen nicht mehr als hundert Jahre. Daraus ergibt sich, dass die Himmelsscheibe um 1600 v. Chr. im Boden niedergelegt wurde. Möglicherweise erfolgte dies in einem rituellen Akt. Durch Nachgrabungen am Fundort und auf Grund der Beschädigungen, welche die Raubgräber an der Scheibe angerichtet hatten, konnten die Archäologen nämlich rekonstruieren, dass die Himmelsscheibe in aufrechter Stellung in einer aus Steinen gebildeten Grube deponiert wurde.

Kürzlich konnte Christian-Heinrich Wunderlich vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie in Halle das Alter der Nebra-Funde sogar direkt ermitteln. An einem der Schwerter fand sich ein Stückchen Birkenrinde, aus dem Wunderlich 0,6 Milligramm Kohlenstoff extrahierte. Das Ergebnis der Radiokohlenstoffmessung: Das Holzstück stammt aus der Zeit um 1600 bis 1560 v. Chr.

Eng mit der Frage nach der Echtheit der Himmelsscheibe verknüpft ist auch die Herkunft ihrer Materialien. Zudem möchten die Archäologen natürlich wissen, woher die einzigartige Scheibe stammt, um sie in den wissenschaftlichen Kontext einordnen zu können. Wurde sie in Mitteldeutschland aus lokalen Rohstoffen hergestellt? Fand vielleicht ein Technologie- oder Materialtransfer über weite Entfernungen statt? War sie gar eine Art Souvenir aus dem Mittelmeerraum? Die Suche nach Antworten kann tiefere Einsichten in die Handelsbeziehungen im bronzezeitli- ▷

Der Hortfund vom Mittelberg in Nebra enthielt außer der Himmelsscheibe weitere Bronzegegenstände: zwei Schwerter, einen Meißel, zwei Beile und Bruchstücke von Armreifen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

chen Europa sowie in die handwerklichen und kulturellen Fertigkeiten in den einzelnen Regionen liefern.

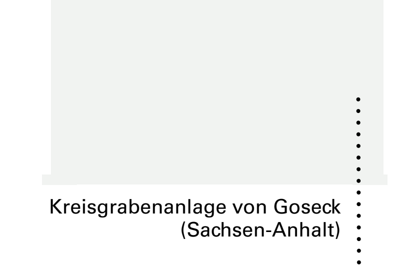
Prähistorische Funde aus Kupfer sind in Mitteleuropa häufig. Fundorte konzentrieren sich insbesondere im Voralpenraum, in der Donauregion, in Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und in Dänemark. Bekannte Kupferlagerstätten gibt es nicht allzu weit von Nebra entfernt: im Harz, im Erzgebirge und im Vogtland. Auf Grund ihres unterschiedlichen Alters und ihrer abweichenden Entstehungsbedingungen weisen verschiedene Lagerstätten unterschiedliche Anteile von Spurenelementen auf. Insbesondere die stabilen Isotope Blei-204, -206, -207 und -208 eignen sich als Indikator; ihre Konzentrationen variieren von einer Lagerstätte zur anderen viel stärker als innerhalb einer Lagerstätte. Mittels eines geo- und radiochemischen Fingerabdrucks sollte sich also die Herkunft des für die Himmelsscheibe verwendeten Kupfers ermitteln lassen.

Da die Bronzefunde vom Mittelberg chemisch einheitlich zusammengesetzt sind und nur hinsichtlich ihres Bleiisotopengehalts variieren, kommen grundsätzlich zwei Möglichkeiten in Betracht: Entweder stammt das Kupfer aus verschiedenen Lagerstätten, die zufällig chemisch identisch sind, oder aus einer einzigen Lagerstätte, die radiochemisch hohe Variationen aufweist.

Die Analysen an der Bergakademie Freiberg, deren Datenbank mehrere zehntausend »Fingerabdrücke« von Kupferfunden und Lagerstätten enthält, zeigen eine Ähnlichkeit zu so genannten Spangenbarren aus dem Voralpenraum. Derartige Barren waren in der Bronzezeit die bevorzugte Handelsform des begehrten Metalls. Auch wenn wegen der Vielzahl der noch nicht untersuchten Lagerstätten die Quelle des Nebra-Kupfers noch nicht mit absoluter Sicherheit identifiziert werden kann, so deuten doch die bisherigen Befunde auf die Lagerstätte vom Mitterberg bei Salzburg. Dort ist bereits für die Bronzezeit Kupferbergbau im großen Stil nachgewiesen: Über einen Zeitraum von etwa 500 Jahren hinweg wurden dort 10 000 bis 15 000 Tonnen

Götter, Gräber und Gestirne

Hinweise auf astronomische Kenntnisse in der Vorgeschichte sind nur aus archäologischen Funden und tradierten Mythen zu erschließen. Während Belege aus der Alt- und Mittelsteinzeit fehlen, scheint der Mensch seit Beginn des Ackerbaus und der Sesshaftigkeit in der Jungsteinzeit, dem Neolithikum, den Himmel systematisch beobachtet zu haben. Oft wurden dabei die Gestirne als Gottheiten personifiziert.



Kreisgrabenanlage von Goseck (Sachsen-Anhalt)

Zyklen prägen das Lebensbild der Menschen: Der Tag-Nacht-Rhythmus, die Mondphasen, die Jahreszeiten und andere Rhythmen des Himmels werden mit den Vegetationszyklen, mit Leben, Tod und Wiedergeburt verbunden.

Altneolithikum

Mit Kalenderbauten werden die Auf- und Untergangspunkte von Sonne und Mond beobachtet (Sonnenwenden, Mondextreme).

Mittelneolithikum

5500 v. Chr. – Linienbandkeramiker führen Ackerbau in Mitteleuropa ein; Beginn sesshafter Lebensweise

5000 – Erste Gold- und Kupfergegenstände werden auf dem Balkan hergestellt.

Ende der Linienbandkeramik durch Konfliktsituationen; Wirtschafts- und Sozialstrukturen verändern sich

4500 – erste Megalithgräber in Westeuropa

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

In der frühen Bronzezeit wurde Kupfer in Form von Spangenbarren oder Beilen gehandelt. Das Rohmaterial für die Himmelsscheibe von Nebra kam vermutlich von der Lagerstätte am Mitterberg bei Salzburg. Lagerstätten im Harz, im Erzgebirge und im Vogtland scheiden wegen ihres abweichenden Gehalts an Spurenelementen und Bleiisotopen als Herkunftsort aus.

Kupfer gefördert und zwar aus Tiefen bis 200 Meter.

Um die Zusammensetzung der Goldauflagen zu analysieren, kooperierten die Wissenschaftler der Bergakademie Freiberg eng mit ihren Kollegen vom Forschungszentrum Rossendorf und von der Bundesanstalt für Materialforschung in Berlin. In Rossendorf diente ein Protonenstrahl dazu, die Atome an der Oberfläche der Scheibe zum Aussenden von Röntgenstrahlen anzuregen. Am Messplatz der Bundesanstalt am Berliner Forschungszentrum Bessy II wurde die Himmelsscheibe – ebenfalls zerstörungsfrei – mit Synchrotronstrahlung bombardiert. Auch in diesem Fall reagierten die Atome in den dünnen Goldblechen mit dem Aussenden von Röntgenstrahlen, deren Wellenlänge für die Atomsorte charakteristisch ist. Mit diesen Verfahren ließ sich die chemische Zusammensetzung des Goldes präzise ermitteln.

Die Ergebnisse ergaben Verblüffendes: Der als Schiff oder Barke gedeutete Bogen enthält wesentlich mehr Gold als die anderen Goldornamente, deren Silberanteil bis zu 23 Prozent beträgt. Der Gehalt an Kupfer ist mit 0,3 Prozent recht gering. Gold mit dieser natürlichen Zusammensetzung ist in Siebenbürgen zu finden – also im gleichen Gebiet, aus dem das im griechischen Mykene verwendete Gold stammt. Einige der Goldobjekte auf der Himmelsscheibe unterscheiden sich zudem in ihrem Zinngehalt. Daraus konnten die Wissenschaftler auf unterschiedliche Herstellungsphasen schließen; unterstützt wird dieser Befund durch das äußere Erscheinungsbild der Goldauflagen (siehe Kasten auf S. 56).

Die Himmelsscheibe hat einen Durchmesser zwischen 31 und 32 Zentimeter und wiegt zwei Kilogramm. In der Mitte ist sie 4,5 Millimeter dick, am Rand etwa 1,7 Millimeter. Sie wurde nicht aus flüssiger Bronze in diesen Abmessungen gegossen, sondern offenbar aus einem kleineren Bronzefladen durch Dengeln ausgetrieben; das erklärt ihre nicht exakt kreisrunde Form. Ein solches Kaltschmieden ist nur möglich, wenn der Zinngehalt – wie im vorliegenden Fall – weniger als 4 Prozent beträgt. Ein höherer Zinnanteil würde die Bronze zu spröde machen. Aber auch so müssen beim Dünnschlagen Spannungsrisse aufgetreten sein, die der bronzezeitliche Schmied dann durch Erhitzen beseitigt hat. Abwechselndes Dengeln und Erhitzen verlieh der Scheibe ihre endgültige Gestalt.

Das Universum auf einer Scheibe

Dieser Herstellungsprozess brachte es mit sich, dass sich die Oberfläche des anfangs bronzen schimmernden Materials verdunkelte. Ob dieser Effekt angestrebt war oder nicht, lässt sich natürlich nicht sagen. Jedenfalls muss die Scheibe ursprünglich eine dunkelbraune bis nachtschwarze Grundfarbe aufgewiesen ha- ▷



MONIKA REICHERT

Pfahlbauten am Bodensee

Megalithgräber im nordmitteleuropäischen Raum

»Ötzi« kommt am Hauslabjoch durch einen Pfeilschuss ums Leben.

Wettergestirne werden als Anzeiger für die Jahreszeiten benutzt.

wintersonnenwend-orientiertes Ganggrab bei Carnac (Frankreich)

Jungneolithikum

Spätneolithikum

4000

3500

Kupferproduktion in der Slowakei, mit zeitlicher Verzögerung auch in den Ostalpen, den Sudeten und im Erzgebirge

Kupferbergbau in Österreich (nördl. Alpenrand); Kupfer-Metallurgie in Thüringen und Sachsen-Anhalt

Innovationsschub im 4. Jahrtausend: Rad und Wagen, Rinder als Zugtiere, Pflug, Bohlenwege in moorigen Gebieten, Salzgewinnung, Textilien aus Wolle

Die Phasen der Himmelsscheibe

Mehrere Details in den Goldverzierungen, die aus 0,4 Millimeter dickem Goldblech gearbeitet und rein mechanisch – durch so genanntes Tauschieren – aufgebracht sind, weisen darauf hin, dass die Himmelsscheibe nicht in einem Vorgang hergestellt wurde, sondern verschiedene Entwicklungsphasen durchlaufen hat.

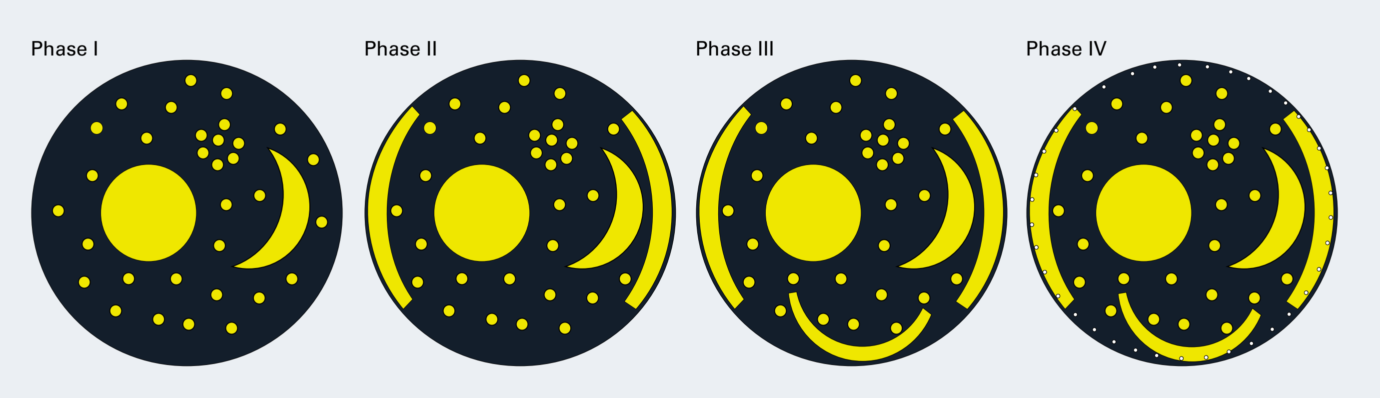
Phase I: 25 Einzelsterne, die Gruppe aus sieben Sternen, der Sichelmond sowie der Vollmond (nach alternativer Deutung die Sonne) werden aufgebracht.

Phase II: Die aus anderer Goldlegierung hergestellten Horizontbögen kommen hinzu. Dazu werden drei Einzelsterne am Rand der Scheibe entfernt, einer wird leicht versetzt zur alten Position aus einem neuen Goldstück (aus der gleichen Legierung wie die Horizontbögen) neu angebracht.

Phase III: Das regenbogenartige Gebilde (als Schiff interpretiert), das aus einer anderen Goldlegierung besteht als die Sterne und die Horizontbögen, wird zwischen die Sterne gezwängt.

Phase IV: Die Scheibe wird entlang ihrem Rand mit Löchern versehen. Dabei werden auch die drei goldenen Bögen durchschlagen. Auf der Rückseite sind die Löcher sauber entgratet.

Die Umgestaltungen der Scheibe scheinen einen grundlegenden Gebrauchswandel anzudeuten. Ungeklärt ist noch, welche Zeitspanne zwischen den einzelnen Phasen verstrich und wie lange die Scheibe überhaupt in Benutzung war. Der linke (östliche) Horizontbogen scheint bereits während der Nutzung abgefallen beziehungsweise absichtlich entfernt worden zu sein. Anschließend wurde die Scheibe in der Erde deponiert.



UWE REICHERT / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ben. Das jetzige grünliche Erscheinungsbild ist auf die Korrosionsschicht aus Malachit – einem kristallinen Kupfercarbonat – zurückzuführen, die während der jahrtausendelangen Lagerung im Erdreich entstanden ist.

Mit ihrer dunklen Färbung muss die Scheibe einen schönen Kontrast zu den glänzenden Goldornamenten geboten haben – was die Deutung als Gestirnsdarstellung noch untermauert. Überhaupt fällt es schwer, gegen eine Interpretation als Abbild des nächtlichen Firmaments zu argumentieren, so offenkundig ist die Darstellung von »Sonne, Mond und Sternen«. Was überrascht, ist das Auftauchen eines solchen Gegenstands ausgerechnet im bronzezeitlichen

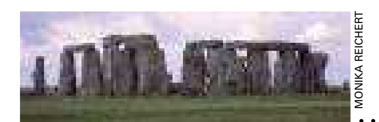


UWE REICHERT

wintersonnenwend-orientiertes Ganggrab Newgrange (Irland)

Troia I; einer der ältesten Orte, in denen Bronze verarbeitet wurde

älteste Goldfunde in Deutschland; wichtige Innovationen in der Metallurgie, die mit dem Aufkommen der nahezu europaweit verbreiteten Glockenbecherkultur zu verbinden sind



MONIKA REICHERT

Baubeginn von Stonehenge II; Prozessionsstraße weist innerhalb von 5 Bogenminuten zum Sonnenaufgang bei der Sommersonnenwende

Newgrange: Am Tag der Wintersonnenwende fällt das Licht der Sonne in die verschlossene Grabkammer – ein Symbol der Erneuerung und Wiedergeburt.

König Gilgamesch bezwingt den Himmelsstier – so beschreibt der sumerische Mythos den Sieg des Frühlings (Sternbild Löwe) über den Winter (Sternbild Stier).

Spätneolithikum

Endneolithikum

3000 v. Chr.

2500

Baubeginn von Stonehenge I (England)

Die Cheops-Pyramide ist auf wenige Bogenminuten genau nach den Haupthimmelsrichtungen ausgerichtet.

Bronzemetallurgie in Mitteleuropa

Der Handwerker, der die Horizontbögen aufbrachte, versetzte einen der Sterne um wenige Millimeter. Offenbar riss das ursprüngliche Goldplättchen beim Einschlagen der Tauschierrinne für den Horizontbogen ab – nach der Restaurierung kam ein Reststück des ursprünglichen Sterns zum Vorschein (Pfeil).

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Mitteleuropa, das bisher nicht gerade als Sitz einer antiken Hochkultur galt. Die Himmelsscheibe ist in der Tat einzigartig: Es ist kein anderes in vorgeschichtlicher Zeit von Menschenhand geschaffenes Werk bekannt, das Gestirne derart konkret darstellt. Selbst im alten Ägypten wurden Sternsymbole nur dekorativ verwendet.

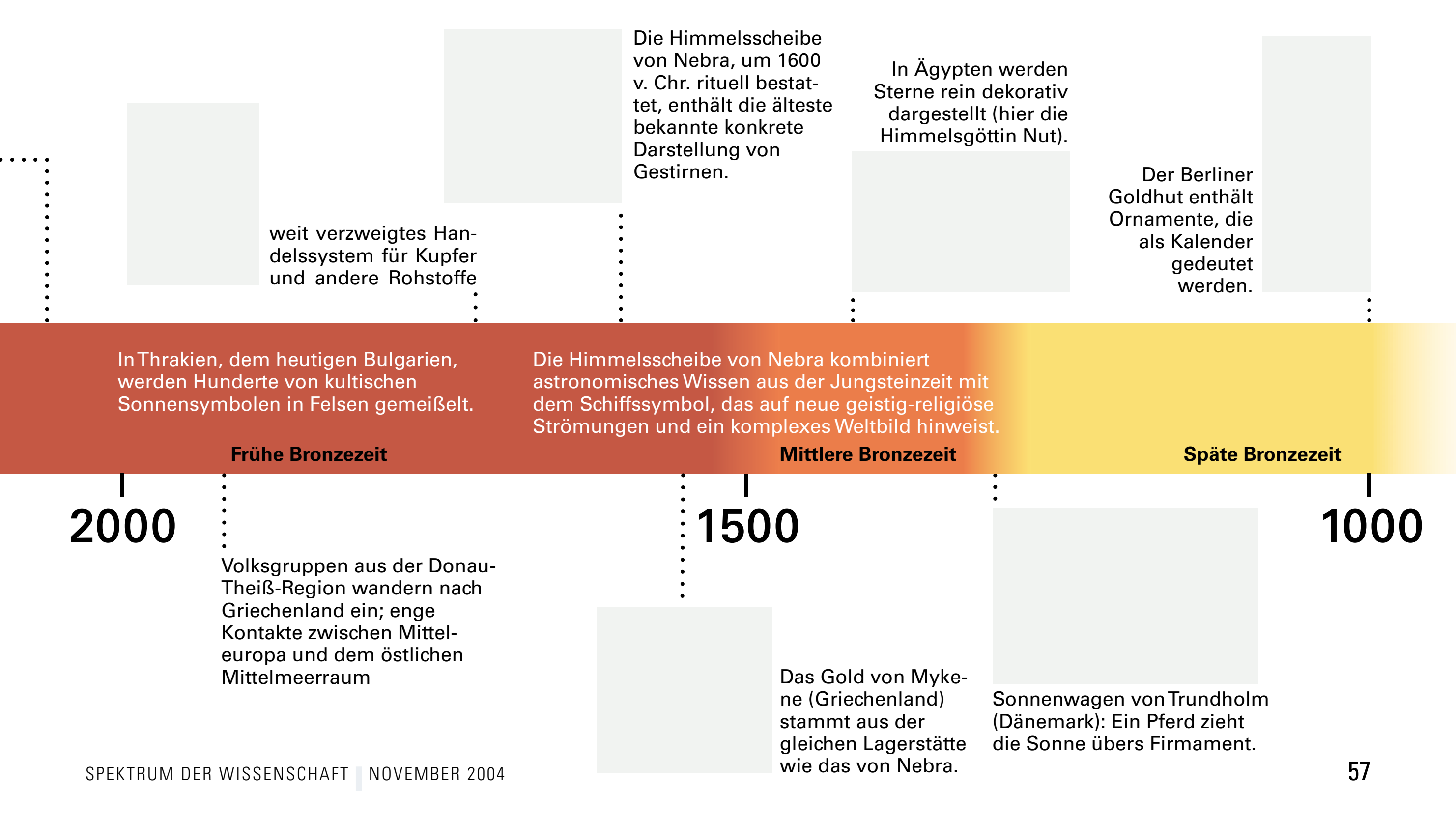
Was zeigt nun die Himmelsscheibe genau? Die beiden größten Goldsymbole lassen sich als Sonne oder Vollmond beziehungsweise als teilverfinsterte Sonne oder als Sichelmond deuten. Am rechten Rand der Scheibe (die Orientierung nach rechts/links und oben/unten hat sich auf Grund der vermuteten Fundlage durchgesetzt) ist ein breiter Bogen angebracht, dessen Sinn sich zunächst nicht erschließt. Auf der linken Seite hatte er einst ein gleich großes Pendant, das aber bereits wohl vor der Deponierung der Scheibe verloren ging. Ein dritter Bogen am unteren Scheibenrand, der stärker gekrümmt ist, fällt wegen seiner Ausgestaltung auf: Anhand der Binnenstrukturierung, die an Schiffsplanken erinnert, und der äußeren Fiederung deuten die Archäologen das Objekt als stark stilisiertes Schiff. Die Art der Darstellung ähnelt Schiffszeichnungen und -ritzungen, wie man sie etwa aus Skandinavien kennt. Schiffssymbole tauchen in Europa erstmals in der Bronzezeit auf und sind womöglich Ausdruck einer neuen Geisteswelt oder Religion.

Zwischen diese Großobjekte sind 30 Goldpunkte eingestreut, die unzweifelhaft Sterne repräsentieren. Die meisten scheinen regellos verteilt, doch sieben von ihnen gruppieren sich zu einem auffälligen »Sternhaufen«. Nicht mit dem Bildgehalt der Scheibe verbunden, aber dennoch nicht ohne Bedeutung sind die Randlöcher, die in äußerst gleichmäßigem Abstand entlang dem Umfang eingeschlagen wurden und auch die Randbögen durchlöchern.

Der oder die Schöpfer der Himmelsscheibe verfügten nicht nur über bemerkenswerte handwerkliche Fertigkeiten. Auch der Gebrauch des Zirkels und Grundkenntnisse in Geometrie müssen damals üblich gewesen sein. Jedenfalls scheinen die Goldplättchen und -bögen nicht willkürlich auf der Bronzescheibe aufgebracht worden zu sein (siehe Kasten auf S. 58).

Exakte Sonnenbeobachtungen

Das zweifellos stärkste Indiz für eine astronomische Nutzung der Scheibe liefern die beiden Horizontbögen, die auf den ersten Blick gar nichts mit Gestirnen zu tun zu haben scheinen. Obwohl einer der beiden Bögen fehlt, lässt er sich anhand seines Abdrucks rekonstruieren. Die Horizontbögen markieren einen Winkel von etwa 82,5 Grad. Dies könnte ein zufälliger Wert sein. Doch wie der Astronom Wolfhard Schlosser von der Ruhr-Universität Bochum errechnete, entspricht dieser Winkel genau dem Bereich, über den innerhalb eines Jahres ein Bronzezeit-Mensch in Sachsen-Anhalt ▷



die aufgehende Sonne am östlichen Horizont beziehungsweise die untergehende Sonne am westlichen Horizont sehen konnte. Wie die Astronomen sagen würden: Der Winkel von 82,5 Grad entspricht der Azimutdifferenz zwischen zwei ausgezeichneten Punkten der scheinbaren Sonnenbahn: nämlich der Sommersonnenwende und der Wintersonnenwende.

Dem dritten Bogen auf der Scheibe, den die Archäologen auf Grund seiner Strukturierung als Schiff interpretieren, lässt sich kein astronomisches Objekt oder Phänomen zuordnen. Hätten wir es mit einer aus Ägypten stammenden Darstellung zu tun, läge ein Vergleich mit der Sonnenbarke nahe, die in der mythologischen Vorstellung der alten Ägypter das Tagesgestirn während der Nacht vom West- zum Osthimmel zurücktransportiert. Zeichnet sich hier vielleicht ein Einfluss aus dem östlichen Mittelmeerraum ab? Setzte sich in der Bronzezeit ein neuer Kult oder eine neue religiöse Vorstellung in Mitteleuropa durch, was die Vielzahl von Schiffsdarstellungen in jener Zeit erklären könnte?

Dem Astronomen Schlosser, der die Deutungsmöglichkeiten der Himmelsscheibe detailliert untersucht hat, fiel auch auf, dass die 25 Einzelsterne (oder »ungebundene« Sterne, wie er sie nennt) nicht zufällig zwischen den Großobjekten verteilt sind. Der bronzezeitliche Handwerker muss darauf geachtet haben, dass sie eine Mindestdistanz zueinander wahren – so als hätte er bewusst vermieden, eine reale Sterngruppierung oder ein Sternbild darzustellen. Umso auffälliger ist die Anhäufung von sieben Sternen oberhalb der beiden Mond- beziehungsweise Sonnensymbole. Schlosser hat eine Arbeitshypothese entwickelt, wonach diese Sterngruppe die Plejaden darstellen könnten. Diese Auffassung wird inzwischen von den meisten Wissenschaftlern geteilt, und in der Tat gibt es gute Gründe dafür. Die Interpretation der beiden übrigen Objekte als Sonne oder Mond hängt dann wesentlich von dieser Annahme ab.

Plejaden als Wettergestirn

Wolfhard Schlosser beruft sich bei seiner These auf die überragende Bedeutung, die den Plejaden bereits in der Antike für das bäuerliche Jahr zukam. Praktisch alle alten Kulturen kannten die Plejaden und versahen sie als ausgezeichnetes Objekt am Himmel mit einem eigenen Namen. Das bekannteste Zitat findet sich bei dem Griechen Hesiod, der um 700 v. Chr. schrieb: »Wenn das Gestirn der Plejaden … aufsteigt, dann fang an mit dem Mähen, und pflüge, wenn sie versinken.« Schlosser zitiert auch eine Bauernregel aus Litauen, einem Land, in dem wegen der spät eingesetzten Christianisierung alte mythologische Vorstellungen weitaus länger zum Volksgut gehörten als in anderen Teilen Europas: »Die Plejaden in der Abendröte, der Ochse vor den Pflug.« Soll heißen: Wenn die markante Sterngruppe nach Sonnenuntergang gerade noch am Westhimmel sichtbar ist, wird es Zeit, die Felder zu bestellen.

Auch andere Kulturen zählten die Plejaden zu den Wettergestirnen, aus deren Abend- oder Morgensichtbarkeit sie Vorhersagen über die Wetterentwicklung und den Ernteerfolg ableiteten oder einfach die wichtigen Termine des bäuerlichen Jahres wie Aussaat und Ernte festlegten. Die Eigenarten der Vegetationszyklen kennen zu lernen war für die Menschen aller agrarisch geprägten Kulturen von eminenter Bedeutung, und sie verknüpften die sich wiederholenden Phänomene der Natur mit den ebenfalls zyklischen Vorgängen am Himmel. Die solcherart abgeleiteten Regeln konnten natürlich nur für den lokalen Lebensbereich und nicht weltweit gültig sein, da unterschiedliche geografische Breiten andere Auf- und Untergangszeiten der Gestirne zur Folge haben.

Geheimnis entschlüsselt?

Welcher Plan lag der Konstruktion der Himmelsscheibe zu Grunde? Wie der Bochumer Astronom Wolfhard Schlosser zeigte, sind die ursprünglich 32 dargestellten Sterne nicht zufällig über die Scheibe verteilt. Vielmehr achtete der bronzezeitliche Meister sorgsam darauf, dass die Goldpunkte sich nicht zu nahe kommen und auch von den beiden Mondsymbolen gebührend Abstand halten. Dadurch wird zugleich der Häufung von sieben Sternen im oberen Teil der Scheibe größeres Gewicht verliehen. Schlossers Deutung zufolge stellt der Sternhaufen ein reales Himmelsobjekt, die Plejaden, dar.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Wer auch immer die Goldbleche appliziert hat: Er wusste mit dem Zirkel umzugehen. Die Mondsichel und das Schiff sind aus Kreisbögen konstruiert. Die Kreise, in die diese beiden Objekte einbeschrieben sind, schneiden sich in einem Punkt innerhalb der Vollmondscheibe, der in etwa mit dem Mittelpunkt der Randlochung übereinstimmt. Dieser gemeinsame Bezugspunkt M unterscheidet sich signifikant von dem Kreuzungspunkt der beiden Verbindungslinien, die man zwischen den Enden der Horizontbögen ziehen kann. Die Winkel, die durch die Horizontbögen definiert werden, betragen 82,5 Grad. Nach Schlossers Untersuchungen entspricht dies dem Winkelabstand zwischen den Auf- beziehungsweise Untergangspunkten der Sonne an den Tagen der Sommer- und Wintersonnenwende. Misst man den Winkel vom Punkt M, so Schlosser, lässt sich daraus sogar ableiten, dass der obere Sonnenrand als Bezugspunkt für den Sonnenauf- und untergang diente.

AUSSTELLUNG

▶ **Die Sonderausstellung** »Der geschmiedete Himmel. Die weite Welt im Herzen Europas vor 3600 Jahren« ist vom 15. Oktober 2004 bis 24. April 2005 im Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle zu sehen. Dienstags bis sonntags sowie feiertags geöffnet von 9 bis 19 Uhr; montags nach Voranmeldung.

Das Weltbild der Himmelsscheibe in sphärischer Darstellung: Über dem Menschen im Zentrum wölbt sich der Himmel mit den Gestirnen, während die Barke die Sonne nachts über den Weltozean nach Osten zurückbringt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von den Arabern der vorwissenschaftlichen Zeit (das heißt, bevor die Araber im 8. und 9. Jahrhundert n. Chr. mit der wissenschaftlichen Astronomie der Griechen in Kontakt kamen) ist zum Beispiel folgende Regel überliefert: »Wenn der Mond in der dritten Nacht seines Neuerscheinens in Konjunktion mit den Plejaden steht, ist der Winter vergangen.« Da die Plejaden relativ nahe an der Ekliptik liegen, an der die Sonne, der Mond und die Planeten entlangziehen, steht der Mond einmal im Monat in ihrer Nähe. Doch nur einmal im Jahr ist die schmale Sichel des zunehmenden Monds bei ihrer ersten Sichtbarkeit nach Neumond dicht bei den Plejaden zu sehen – und zwar im Frühling, kurz nach Sonnenuntergang, wenn beide Gestirne in niedriger Höhe über dem Westhorizont stehen. Ist die Mondsichel bereits drei Tage »alt«, so wird sie etwa in der zweiten Februarhälfte in der Nähe der Plejaden stehen, was in dem genannten Zitat zum Ausdruck kommt.

Eine frühbronzezeitliche Sternkarte?

Während frühere Kulturen der Sichtbarkeit der Plejaden im Jahreslauf und ihrer Verbindung zu den Jahreszeiten und Vegetationszyklen große Bedeutung beimaßen, sucht man solche Angaben in modernen astronomischen Jahrbüchern vergebens. Schlosser machte sich deshalb daran, die Sichtbarkeitsbedingungen dieses Gestirns für die Region um Nebra zu berechnen. Er fand, dass die bronzezeitlichen Einwohner Sachsen-Anhalts die Aufgangsstellung der Plejaden am Osthimmel kaum für kalendarische Zwecke nutzen konnten. Anders hingegen deren Untergangsstellung am Westhimmel: Die letzte Sichtbarkeit der Plejaden am Abend (also bevor die Sonne zu nahe an sie herangerückt ist und sie im Dämmerungslicht unsichtbar werden) fällt auf einen nur wenige Tage langen Zeitraum um den 10. März; ihr erster sichtbarer Morgenuntergang (wenn die Sonne im Jahreslauf so weit nach Osten gerückt ist, dass sie beim Untergang der Plejaden noch nicht aufgegangen ist) ist ähnlich scharf um den 17. Oktober definiert. Diese beiden Termine stimmen recht gut mit dem Beginn und dem Ende des bäuerlichen Jahres überein.

Könnte die Darstellung auf der Himmelsscheibe etwas mit diesen Stichtagen zu tun haben? Schlosser meint ja. Hält man die Himmelsscheibe wie eine moderne Sternkarte, dann markiert der fehlende Horizontbogen den östlichen Horizontbereich, in dem die Sonne aufgeht. Der noch vorhandene rechte Horizontbogen repräsentiert analog den Bereich, in dem die Sonne im Westen untergeht. Die Sichel des zunehmenden Monds stellt zusammen mit den Plejaden die astronomische Situation zu Beginn des bäuerlichen Jahres dar, wenn beide Gestirne dicht benachbart über dem Westhorizont stehen. Am Ende des bäuerlichen Jahres, Mitte Oktober, sind die Plejaden frühmorgens zusammen mit dem Vollmond über dem Westhorizont anzutreffen (beide Objekte stehen der Sonne gegenüber, die sich noch unter dem Osthorizont befindet). Demnach wäre der goldene Vollkreis als Vollmond und nicht als Sonne zu interpretieren.

Diese Überlegungen klingen schlüssig und sind auch mit den Herstellungsphasen der Himmelsscheibe konsistent. Die dargestellte Szenerie könnte also das astronomische Wissen repräsentieren, das die ersten Bauern des Neolithikums über Generationen hinweg erarbeitet haben und bis in die Bronzezeit hinein tradierten. Irgendwann vor 1600 v. Chr. machten sich dann Vorstellungen aus dem östlichen Mittelmeerraum in Mitteleuropa bemerkbar, die schließlich die Nutzer der Himmelsscheibe dazu inspirierten, das Schiffssymbol zu ergänzen. Aber warum die Scheibe vergraben wurde, werden wir wohl nie erfahren. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Uwe Reichert ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. Zu den besonderen Interessen des promovierten Physikers gehört die Kulturgeschichte der Astronomie.

Der geschmiedete Himmel. Die weite Welt im Herzen Europas vor 3600 Jahren. Von Harald Meller (Hg.). Theiss, Stuttgart 2004

Die Himmelsscheibe von Nebra. Fundgeschichte und archäologische Bewertung. Von Harald Meller, in: Sterne und Weltraum, Bd. 42, Heft 12, S. 28 (2003)

Astronomische Deutung der Himmelsscheibe von Nebra. Von Wolfhard Schlosser, in: Sterne und Weltraum, Bd. 42, Heft 12, S. 34 (2003)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Erschöpfung der Weltmeere

In wenigen Generationen ist der einst unermessliche Reichtum des Ozeans durch Überfischung auf kümmerliche Reste zusammengeschrumpft. Bis die komplexe Ökologie der Meere erforscht und eine nachhaltige Fischerei etabliert ist, wird weit mehr Zeit vergehen.

Von Antje Kahlheber

Wenn man die von Meer bedeckte Erdoberfläche auf die Größe eines Fußballfelds verkleinerte, dann würden im selben Maßstab die Schutzgebiete, in denen ein effektives Fischereiverbot herrscht, nur knapp die Fläche einer aufgeschlagenen Zeitung einnehmen. Dies ist ein krasses Missverhältnis, klagen Wissenschaftler und Umweltschützer, denn weltweit befinden sich zahlreiche Fischbestände in bedenklichem Zustand. Jahr für Jahr fangen die Fischer viel mehr, als im Interesse einer dringend nötigen Erholung der Bestände angebracht wäre.

Ein zunehmend größerer Anteil des Fangs besteht aus Jungfischen, die noch nichts zur Erhaltung ihrer Art beitragen konnten. Den betroffenen Populationen fehlt im nächsten Jahr der Nachwuchs, eine Katastrophe, die schon einige Fischbestände erreicht hat. Die Kabeljaufischerei in Kanada wurde 1992 geschlossen, als nur noch ein Prozent des einstmals riesigen Bestands übrig war. Und die ehemals die Weltmeere bevölkernden großen Fische wie Tunfisch, Hai und Heilbutt sind in 50 Jahren auf ein Zehntel ihrer Menge geschrumpft.

Auch in den 46 Fischzonen der europäischen Gewässer geht es längst nicht mehr nur um den Kabeljau. Bereits jetzt stammen zwischen 50 und 80 Prozent des Angebots in europäischen Fischkühltheken aus fernen Meeren und manchmal von Küsten, deren Bewohner die Eiweißquelle dringend selbst benötigen würden. Europäische Subventionen tragen dazu bei, dass der Verbraucher von der Verknappung wenig merkt.

Die wissenschaftliche Erforschung der marinen Ökosysteme hinkt dieser rasanten Entwicklung hinterher. Das liegt nicht etwa daran, dass den Wissenschaftlern das Problem zu lange entgangen wäre; im Gegenteil. Schon 1890, als die deutsche Fischerei nur noch halb so viel Schellfisch anlandete wie in den Jahren zuvor und die Größe der gefangenen Fische stetig abnahm, nannten sie die Ursache beim Namen: »Überfischung«.

In den letzten Jahren sind zunehmend mehr wissenschaftliche Veröffentlichungen zu diesem Thema erschienen, die – bei wechselnden Orten und Artnamen – immer wieder dieselbe Nachricht verkünden: Die Meere steuern auf eine ökologische und die Fischerei auf eine wirtschaftliche Katastrophe zu.

Obwohl diese Warnungen seit einigen Jahren besser begründet sind als je zuvor, haben sie es schwer, bei den politisch Verantwortlichen und den Fischern selbst Gehör zu finden. Grund dafür ist die Komplexität unter den Wellen, die keine einfachen Antworten erlaubt und große Interpretationsspielräume zulässt. Ein rasches Absinken der Individuenzahl von einem Jahr zum anderen muss nicht auf Überfischung beruhen, sondern kann andere Gründe haben. Da die meisten Fische als so genannte r-Strategen ungeheure Mengen an Nachwuchs produzieren, können sich geschädigte Bestände unter günstigen Bedingungen rasch wieder erholen. So führen arbeitsmarktpolitische und wirtschaftliche Interessen zu Ablehnung und Verzögerungstaktik gegenüber empfohlenen Maßnahmen.

Über das Massensterben am Ende der Eiszeit ist heute mehr bekannt als über das, was vor 300 bis 100 Jahren an den Meeresküsten geschah. Nach historischen Dokumenten sowie Funden von

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Fischüberresten auf Müllhalden und in Küstensedimenten muss es an der gesamten Atlantikküste von großen Meereswirbeltieren nur so gewimmelt haben. Genauer festzustellen, um wie viel ärmer der Ozean seitdem geworden ist, bereitet aber einige Schwierigkeiten. Es gibt keine unberührten Meere mehr, die als Referenz für einen quasinatürlichen Zustand dienen könnten.

Große Unbekannte: die »natürliche Bestandsgröße«

Der Genetiker Joe Roman von der Harvard-Universität ermittelte mit dem Biologen Stephen Palumbi von der Universität Stanford (Kalifornien) die einstige Anzahl von nordatlantischen Buckel-, Finn- und Zwergwalen auf indirektem Wege. Die genetische Vielfalt innerhalb einer Population nimmt im Allgemeinen zu, je länger die Population existiert und je größer sie ist; denn entsprechend mehr Gelegenheit haben zufällige Mutationen, zu entstehen und sich auszubreiten. Für die DNA der Mitochondrien, die nur über die mütterliche Linie vererbt wird, lässt sich diese Tatsache in ein handhabbares mathematisches Modell fassen. Da Evolutionsbiologen wissen, dass Buckel- und Finnwale vor mindestens sechs Millionen Jahren aus einem gemeinsamen Vorfahren entstanden, und die genetische Vielfalt der mitochondrialen DNA an den heute lebenden Tieren noch zuverlässig messbar ist, lässt sich die letzte Unbekannte, die natürliche Populationsgröße, aus den anderen Daten berechnen. Roman und Palumbi kamen zu dem Schluss, dass die Buckel-, Finn- und Zwergwalpopulationen der Meere durchschnittlich zehnmal so groß gewesen sein müssen, wie aus Logbucheintragungen zu erschließen ist. Diesen dramatischen Rückgang führen die Forscher auf den industriellen Walfang zurück.

Auch für die Fische wurden die ursprünglichen Bestandsgrößen lange Zeit aus historischen Aufzeichnungen bestimmt und damit möglicherweise ähnlich stark unterschätzt (Kasten S. 64/65).

Unter ansonsten gleich bleibenden Umständen ist die Fangmenge proportional dem Bestand. Wenn es dem Bestand schlecht geht, merken das die Fischer unmittelbar daran, dass nur noch wenige Fische ins Netz gehen. Dieser einfachste und einleuchtendste Indikator für das Schwinden der Bestände hat jahrzehntelang versagt, denn die Fischereiflotte nahm wesentlich schneller zu, als die Bestände abnahmen.

Andere Effekte kamen hinzu: Wenn manche Fischarten selten wurden oder ihre Bestände – wie bei kalifornischer Sardine oder Neuengland-Kabeljau – zusammenbrachen, zogen die Fischer weiter in unberührte Gewässer. Staatlich subventionierte Flotten beuteten mit modernster Fangtechnik immer fernere Meere und tiefere Regionen aus. Mit Ultraschall arbeitende Ortungsgeräte sind in der Lage, auch noch die letzten Fisch- ▷

▲ **Ein reiches Nahrungsangebot an Fischabfällen aus dem Beifang hat einige Möwenarten wie die große Raubmöwe über die Maßen zahlreich werden lassen. Ein Wegfall dieser Nahrungsquelle, etwa durch Beschränkung der Fischerei, hat die paradoxe Folge, dass die Raubvögel auf anderes Futter ausweichen und damit die Brutkolonien von kleineren Seevögeln wie Dreizehenmöwen oder Papageientauchern gefährden.**

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die heutige genetische Vielfalt unter den Buckelwalen weist darauf hin, dass einst viel mehr dieser Meeressäuger den Ozean besiedelten als bislang angenommen.

schwärme aufzuspüren. Entsprechend vervierfachten sich zwischen 1950 und 1988 die bei der Welternährungsorganisation FAO gemeldeten Fangmengen auf 88,6 Millionen Tonnen.

Schließlich konnte auch die neueste Technik den Raubbau an den Meeren nicht mehr verdecken, und eine weitere Steigerung der Aktivitäten brachte keine zusätzlichen Fische in die Netze. Ende der 1980er Jahre kehrte sich der Aufwärtstrend erstmals um. Nur China schien seltsamerweise nicht betroffen.

Die Fischereiwissenschaftler Daniel Pauly und Reg Watson von der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) sorgten für Aufsehen, als sie statistisch nachweisen konnten, dass China und einige andere Länder viele Jahrzehnte lang zu hohe Fangmengen angegeben hatten. Das hatte innenpolitische Gründe: Die chinesische Fischereiindustrie wollte die Vorgabe der Regierung zur Produktivitätssteigerung wenigstens auf dem Papier erfüllen. Doch China verschleierte damit auf Grund seiner Größe und der Höhe seiner Falschangaben den weltweiten Ausverkauf der Meere und wird seitdem gesondert in vielen Statistiken geführt.

Indem Pauly und Watson die chinesischen Fangmengen durch realistische Zahlen ersetzten, kamen sie zu dem erschreckenden Ergebnis, dass die globalen Fischanlandungen seit den späten 1980er Jahren um jährlich 700 000 Tonnen abgenommen haben. Auch wenn sich in den vergangenen Jahren eine Stabilisierung abzuzeichnen scheint, bewertet die FAO inzwischen drei Viertel der weltweit bewirtschafteten Fischbestände als »maximal genutzt«, »überfischt« oder »erschöpft«.

In den europäischen Gewässern sind zurzeit 14 Fischbestände des Nordostatlantiks, der Ostsee und des Mittelmeers stark durch übermäßige Nutzung beeinträchtigt; das belegen wissenschaftliche Gutachten wie das des Internationalen Rats der Meere (*International Council for the Exploration of the Sea*, ICES). Die Dynamik der Überfischung liegt laut Daniel Pauly und dem Meeresbiologen Rainer Froese vom Kieler Institut für Meereskunde weit über dem Weltdurchschnitt. Jahr für Jahr wird ein zu großer Anteil der jungen Generation gefangen.

Der Bestand erwachsener Dorsche in der östlichen Ostsee schrumpfte von 691 000 Tonnen im Jahr 1980 auf seinen bisherigen Tiefstand von 60 000 Tonnen im Jahr 2000. Rund 90 Prozent der gefangenen Dorsche haben noch nicht ihre volle Geschlechtsreife.

Im Mittelmeerraum lässt die mangelnde Zusammenarbeit der Anrainerstaaten in Forschung und Bestandsbewirtschaftung nur wenige Schätzungen zu. Viele Bestände von Fischen und Schalentieren sind überfischt, so Seehechte im Golfe du Lion (vor der Rhônemündung) und im Tyrrhenischen Meer, Sardinen in der Adria, Langusten an den Küsten Korsikas und Sardiniens und Meerbrassen in der Meerenge von Gibraltar. Die Fangmengen in der Adria und der Meerenge von Sizilien sind in den vergangenen 20 Jahren um mehr als die Hälfte zurückgegangen – trotz des gestiegenen Fischereiaufwands. Die Sportfischerei wird dabei überhaupt nicht berücksichtigt, obwohl sie nach Schätzungen mehr als zehn Prozent des gesamten Fischfangs ausmacht.

»Wir müssen uns damit abfinden, dass das Modell der Natur nicht ›ökonomisches Wachstum‹ heißt, sondern ›ökologisches Gleichgewicht‹«, sagt Gerd Hubold, Leiter der Bundesforschungsanstalt für Fischerei in Hamburg und deutscher Delegierter beim ICES. Die Fischereiforschungsinstitute der 19 Mitgliedsländer des ICES ermitteln aus langjährigen Datenreihen Sollwerte für eine nachhaltige Befischung. Seit etwa sechs Jahren berücksichtigen ihre Berechnungen mit dem »Vorsorgeansatz« *(precautionary approach)* wesentliche Faktoren wie Elternbiomasse, Befischungsintensität und beobachtete Nachwuchsproduktion. Auf

deren Grundlage gibt der ICES jährliche Fangempfehlungen für etwa 130 Fischbestände ab. So sprach er sich im vergangenen Jahr für ein vollständiges Fangverbot von Kabeljau in der Nordsee, Dorsch in der Ostsee, Wittling in der Irischen See und Seehecht in den Gewässern westlich der Britischen Inseln aus.

Doch obwohl viel Zeit und Geld in die Fischereiforschung gesteckt wird – befolgt werden ihre Empfehlungen letztendlich kaum. Wie vor hundert Jahren setzt die Leere in den Netzen zwar politische Prozesse in Gang. Aber inzwischen hat sich das Problem wie auch der bürokratische Aufwand vervielfacht.

Schlechte Noten für Europa

Die Europäische Kommission hat längst begonnen, sich um die Fischbestände zu sorgen, und folgt in ihren Vorschlägen weit gehend den wissenschaftlichen Gutachten. Ihre Handlungsfähigkeit endet jedoch regelmäßig kurz vor Weihnachten an der fehlenden Zustimmung des Fischereirats. In ihm sitzen die Minister der Mitgliedstaaten, und sie haben das letzte Wort darüber, wie viel Fisch gefangen werden darf in den 46 Fischzonen der europäischen Meere. Seit 16 Jahren beschließen sie Fangmengen, die durchschnittlich ein Drittel über den Empfehlungen des ICES liegen.

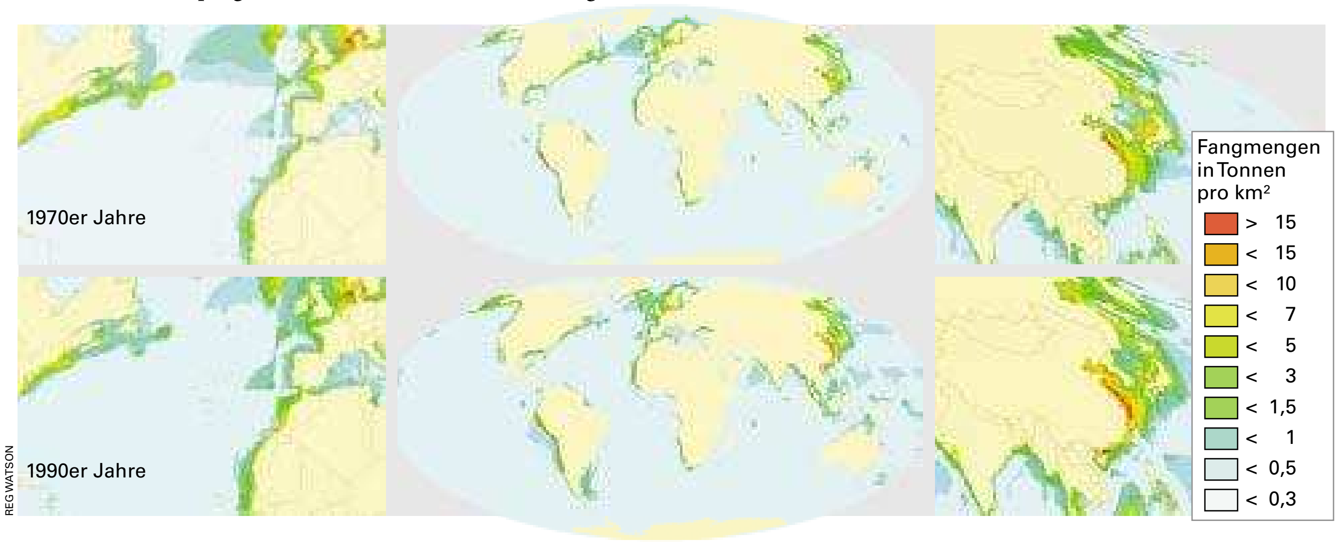
So setzen sich kurzfristige wirtschaftliche Interessen der Mitgliedstaaten oft gegenüber einem verantwortungsvoll angelegten Ressourcenschutz durch. Wenn einzelne Länder, wie zuletzt Deutschland und Schweden, Fangverbote, etwa für Kabeljau, fordern, blockieren andere, diesmal Frankreich und Belgien, einen Beschluss oder setzen zahlreiche Ausnahmen beim Schutzprogramm durch. »Die Fischerei ist einer der am stärksten auf Brüssel fixierten Politikbereiche«, erläutert Hubold. »Selbst in der nationalen Hoheitszone kann ein Mitgliedstaat der EU nur für die eigenen Fischer direkte Restriktionen verhängen, andere EU-Fischer müssen sich nicht daran halten.«

Im vergangenen Dezember verabschiedete der Fischereirat immerhin erstmals einen mehrjährigen Bewirtschaftungsplan für den Kabeljau. Darin wurde zwar die Fangquote von ihrem hohen Wert nicht herabgesetzt, obgleich die Fischer sie im vergangenen Jahr mangels Fisch nicht ausschöpfen konnten. Aber zugleich setzte der Fischereirat eine Zielvorgabe von 30 Prozent Bestandserholung pro Jahr fest. »Ein strategischer Fortschritt«, erklärt Hubold. »Natürlich wird der Kabeljaubestand am Ende dieses Jahres nicht um 30 Prozent gewachsen sein, dann aber hat die Kommission erstmals die Handhabe, auch gegen den Willen der Mitgliedsländer gesetzlich einzugreifen und Handlungsmaßnahmen zu beschließen.« 2004 ist nach Hubold ein Übergangsjahr, in dem für den Kabeljau noch nicht viel Gutes zu melden sein wird. Ähnliches gilt für Seehecht und Scholle.

Eigentlich hätte man schlauer sein müssen in Brüssel. Vor Neufundland brach der Kabeljaubestand Anfang der 1990er Jahre zusammen. Zwar sprach die Regierung ein generelles Fangverbot aus, und 30 000 Fischer verloren ihren Job. Aber die anhaltende Restbefischung durch die lokale Küstenfischerei verhindert bis heute die Erholung des einst riesigen Bestands. »Um den Kabeljau wirksam zu schützen, müssten alle Grundfisch-Fischereien zeitweise geschlossen werden«, sagt Hubold, »dann aber stehen vor allem die kleinen Fischer vor dem Aus.«

Die Quotenfestlegung ist ein Teil der Schlacht, ihre Einhaltung ein anderer. Die Umsetzung der Erhaltungs- und Kontrollmaßnahmen ist Sache der Mitgliedstaaten. So kann die EU wenig mehr tun, als die Übertretungen ihrer Mitglieder publik zu machen. Drei Viertel der laufenden Verstoßverfahren betreffen Überfischung. Bereits die Angaben der Kapitäne über Fang- und Anlandemengen sind häufig gefälscht oder nicht vorhanden. Stichproben in Spanien ergaben, dass nur 15 Prozent des angelandeten Seehechts der Quote nach genehmigt waren.

Die derzeitigen Überwachungsvorschriften reichen nicht aus. »Wir haben in einigen Ländern unhaltbare Zustände, sie sind nicht bereit, ihre Fischereien ausreichend zu kontrollieren, da drücken Kontrolleure nicht nur zwei Augen zu, sondern schauen auch mal ganz weg«, klagt Hubold. Als besonders uneinsichtig zeigen sich die Schotten: Sie ignorie- ▷



▼ Fischfang weltweit in den 1970er (obere Reihe) und in den 1990er Jahren (untere Reihe). Während sich im Nordatlantik (Detailkarten links) bereits die Erschöpfung der Bestände bemerkbar macht, sind die Fangmengen vor der chinesischen Küste (rechts) noch stark angestiegen – zumindest auf dem Papier. Inkonsistenzen in dieser Karte von Reg Watson wie der helle Streifen vor der Küste Spaniens sind darauf zurückzuführen, dass der Fangort im Gegensatz zum Anlandeort nicht bekannt ist und rekonstruiert werden muss.

▷ ren derzeit die rechtlichen Vorschriften der Kommission und landen Fische – von den lokalen Kontrollen geduldet – illegal an. Die EU reagiert mit dem Aufbau einer zentralen Überwachungsbehörde. Vom galizischen Vigo aus, an der wichtigsten Fischereiküste Spaniens, will sie Inspektoren aussenden, die in Zukunft jeden fünften Kutter kontrollieren sollen. Doch die Sanktionen, die bisher gegen überführte schwarze Schafe verhängt werden, können, so Hubold, »zu oft aus der Portokasse bezahlt werden«.

»In Anbetracht der fragwürdigen Datenqualität muss mit tatsächlich noch höheren Quotenüberschreitungen gerechnet werden«, fürchtet die EU-Kommission. Aus diesen Daten versuchen die Wissenschaftler im Abgleich mit ihren Forschungsergebnissen glaubwürdige Zahlen zu rekonstruieren. Im Zweifelsfall korrigieren sie nach dem Vorsorgeprinzip die Bestandszahlen nach unten. »Und das ist dann Wasser auf die Mühlen der Fischer, die in zum Teil absurden Diskussionen behaupten, dass die Fischbestände hervorragend sind, und wissenschaftliche Empfehlungen als unsicher hinstellen, sodass fällige Maßnahmen verzögert werden«, berichtet Hubold.

Die Fischer setzen jeder Restriktion erhebliche Widerstände entgegen, und das nicht aus schnöder Habgier: Es ist die nackte wirtschaftliche Existenzangst, die sie zum Raubbau am Meer treibt. Oft hat ein Fischer in Boote und Fanggeräte so viel investiert, dass ihn bereits ein kürzeres Fangverbot ruinieren würde. Eine langfristige Pflege der Ressourcen ist unter diesen Umständen nicht zu erwarten. Schon werden Rufe nach handelbaren Fangrechten laut, die ein persönliches Interesse am Schutz der Bestände erhöhen sollen.

Eine Fischerei, die auch nur annähernd im heutigen Stil weitergeführt wird, kann nicht nachhaltig sein. Dass dies so schwer einzusehen ist, hängt wohl mit dem hartnäckigen Mythos der unerschöpflichen Meere zusammen, der zu einer Zeit entstand, als Menschen in kleinen Booten begannen, dem riesigen Ozean ihren Nahrungsunterhalt abzuringen. Heute dagegen besitzt die EU mit 100 000 Fangschiffen die drittgrößte Fischereiflotte der Welt. Zwischen 1994 und 1999 trugen knapp 2,7 Milliarden

Schätzung von Fischbeständen: ein konkretes Beispiel

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Der Kabeljau-Bestand in der Nordsee ist auf 10 Prozent seiner Größe von 1950 zurückgegangen.

Blick ins Leere

Von Nardine Löser

Auch 2004 ist dem Kabeljau in der Nordsee nicht geholfen. Erst im nächsten Jahr ist mit ersten Einschränkungen der Fangquote zu rechnen. Ein Wettlauf gegen die Zeit, denn jüngste Veröffentlichungen wie die von Ransom Myers und Boris Worm *(Nature, Bd. 423, S. 280)* zeigen, dass die Situation in den Meeren noch viel dramatischer ist als befürchtet.

Die beiden Fischereiwissenschaftler von der Dalhousie-Universität in Halifax (Kanada) haben für zahlreiche Fischpopulationen die ursprünglichen Bestandsgrößen erschlossen, das heißt die Anzahlen im fast unbefischten Meer vor Beginn der industrialisierten Fischerei in den 1950er und 1960er Jahren. Erst dadurch wird klar, wie drastisch die Weltmeere durch die Fischerei bereits leer geräumt worden sind. Ihren Erhebungen zufolge haben die Populationen größerer Raubfische wie Marlin, Segelfisch, Schwertfisch, Tunfisch, Kabeljau, Heilbutt, Flunder und Rochen nur noch 10 Prozent ihrer ursprünglichen Größe.

Zehn Jahre lang hatten Myers und Worm Datensätze über die weltweiten Fänge zusammengetragen. Für ihre Erhebungen verglichen und ergänzten sie Statistiken von damaligen Forschungsfahrten mit Angaben der durch die Fischereiindustrie angelandeten Fische. Sie beschränkten sich auf jene Meeresregionen, für die vollständige Datenreihen erstellt werden konnten: die äquatorialen und südlichen Teile des Atlantiks, Indiks und Pazifiks. Komplette Fangstatistiken konnten sie auch für vier Schelfmeere erstellen: Golf von Thailand, Antarktisches Meer vor Südgeorgien und die Gebiete Saint Pierre Bank und Southern Grand Bank im Nordwest-Atlantik.

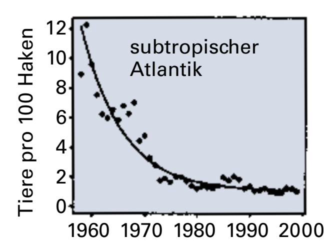
Für die Auswertung der globalen Fänge nutzten die Wissenschaftler die Biomasse der Fische, die im Falle der Hochseegebiete in die für Langleinenfischerei typische Einheit »Anzahl der Tiere pro 100 Haken« umgerechnet wurde. Aufgetragen in Abhängigkeit von der Zeit zeigen diese ein Abnehmen der Fangmenge, was wiederum einen Rückgang der Population bedeutet – vorausgesetzt, die Fischereiindustrie ist im System der maßgebliche Faktor, und ihr Aufwand ist über die Zeit gleich geblieben. Myers und Worm legten in diese Diagramme Kurven, welche alle Fangdaten möglichst getreu wiedergeben sollten; die Form der Kurven war durch plausible Modellannahmen begründet (siehe Kasten). Wenn man die Kurven in die Vergangenheit verlängert, für die mangels Fischerei keine Fangdaten vorliegen, kommt man zu Schätzwerten für die ursprünglichen Populationsgrößen und die jährliche Abnahme.

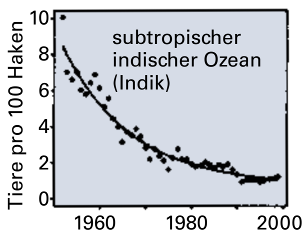
Die Ergebnisse sind erschreckend: Pro Jahr haben die weltweiten Bestände um etwa 16 Prozent abgenommen. Die Biomasse der großen Raubfische ist seit dem Einsetzen der

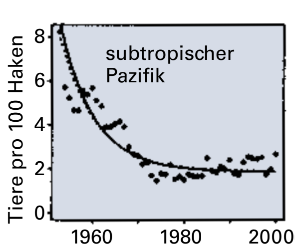
Euro Gemeinschaftsgelder zur Anschaffung neuerer Schiffe, stärkerer Bootsmotoren, größerer Netze oder moderner Sonarsysteme und damit zur Überkapazität bei. Die Europäische Kommission schätzt, dass die Flotte inzwischen, gemessen an den Bestandszahlen, um 40 Prozent überdimensioniert ist, und arbeitet seit beinahe 16 Jahren an ihrer Verkleinerung. Mit wenig Erfolg, denn die meisten EU-Länder wollen die Kapazität ihrer Flotten erhalten: Es könnten ja irgendwann wieder mehr Fische im Meer schwimmen. So einigten sich die Minister auf eine Fangtageregelung: Schon im vergangenen Jahr durfte ein Kabeljaufänger nur neun Tage im Monat auf Fang. »Das ist ein untauglicher Ansatz«, sagt Hubold. Der wirtschaftliche Druck, der durch die Verkürzung der Fangzeit auf den Fischern lastet, kann nicht zu schonenden Fangtechniken beitragen.

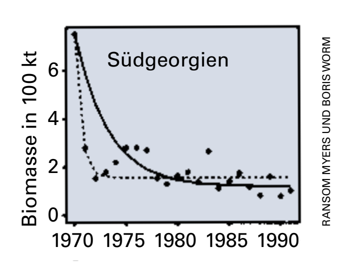
Zudem spiegeln die Anlandemengen nicht wider, was draußen auf dem Meer geschieht, denn die meisten der eingesetzten Fangtechniken führen zu enormen Beifängen. Zur optimalen Nutzung von Ladekapazitäten und Fangquoten werfen die Fischer nutzbare, aber minderwertige Fische wieder über Bord. Fische, für die sie keine Fangquote besitzen, dürfen sie erst gar nicht anlanden. Allein in der Nordsee kippen die Fischer etwa 725 000 Tonnen zurück ins Meer, das ist fast ein Viertel der angelandeten Fänge. Beim Schellfisch fangen sie zeitweise doppelt bis dreimal so viel, wie letztlich an Land gelangt. Nur zehn Prozent der wieder über Bord gehenden Fische überlebt den Fang, die restlichen 90 Prozent fallen für den Erhalt des Bestands aus. Außerdem gehen Tiere, deren Fang verboten ist, wie der Schweinswal in Nord- und Ostsee, in solchen Mengen ins Netz, dass auch ihr Bestand bedroht ist. Dennoch konnte sich die EU nicht dazu durchringen, das Fangen mit bis zu 21 Kilometer langen Treibnetzen auf der Ostsee sogleich zu verbieten; sie verschob ein Verbot auf das Jahr 2008. Die für die Wale noch gefährlicheren Grundstellnetze bleiben erlaubt, müssen aber mit akustischen Vergrämungsvorrichtungen, so genannten Pingern, ausgestattet werden. Das gilt allerdings nur für die Fischerei mit Kuttern über 12 ▷

Der Rückgang der Fischpopulationen – modelliert









RANSOM MYERS UND BORIS WORM

Ransom Myers und Boris Worm legten ihrem mathematischen Modell folgende Annahmen zu Grunde: Eine Fischpopulation hat einen gewissen Sockelbestand, der auch durch intensive Fischerei nicht angetastet wird. Der darüber hinausgehende Anteil des Bestands verliert in jedem Jahr einen konstanten Prozentsatz seiner jeweiligen Größe. Das wird durch die Funktion

$$N(t) = N(0)\,[(1-\delta)\,e^{-rt} + \delta]$$

dargestellt. Dabei ist $N(t)$ die Biomasse zum Zeitpunkt t. $N(0)$ steht für den unbefischten Bestand und ist bislang unbekannt, ebenso r und δ, welche die jährliche Verlustrate beziehungsweise den Sockelbestand beschreiben. Für diese drei Unbekannten berechneten Myers und Worm – für jede Fischpopulation getrennt – diejenigen Werte, welche die sich aus dem Modell ergebende Kurve den empirischen Werten am nächsten bringen. Was »am nächsten« genau bedeutet, dafür kennt die Statistik verschiedene Auffassungen, die auch zu unterschiedlichen Kurven führen. Die durchgezogene Kurve basiert auf einer geläufigen Auffassung (Maximum-Likelihood-Schätzung), die gestrichelte auf einer anderen (Bayes-Schätzung).

industriellen Fischerei auf 10 Prozent der ursprünglichen Populationsgröße geschrumpft. Allein innerhalb der ersten zehn Jahre reduzierte sich der Fang von ursprünglich sechs bis zwölf Tieren pro 100 Haken auf 0,5 bis zwei. Dabei traf es die Meere der gemäßigten Gebiete besonders hart. Der Extremfall ist das fischreiche Schelfgebiet vor Südgeorgien (Antarktisches Meer, Diagramm ganz rechts). Hier dauerte es nur zwei Jahre, bis die im küstennahen Wasser lebenden Tiere abgefischt waren.

Das Modell von Myers und Worm lässt – unter anderem – außer Acht, dass im Erhebungszeitraum die Fangmethoden weitaus effektiver geworden sind, dass Fischpopulationen sich gegenseitig beeinflussen – den Beutefischen geht es zunächst besser, wenn ihre Fressfeinde weggefischt werden – und dass andere Einflüsse als die Fischerei den globalen Rückgang mit verursacht haben könnten. Entsprechend unsicher sind ihre Ergebnisse. Gleichwohl zeigen sie einen beängstigenden Trend. Darüber hinaus begründen Myers und Worm überzeugend, warum ihre Vereinfachungen die Katastrophe eher unter- als überschätzen. Sie fordern deshalb die Neuberechnung der Fangquoten und die Einrichtung fangfreier Zonen. Denn bislang gehen in die Berechnung der Quoten nur Daten aus wissenschaftlichen Fängen ein. Diese wurden jedoch erst einige Jahre nach dem Einsetzen der Industriefischerei zur Kontrolle der Bestände angewendet.

Nardine Löser ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Rostock.

Meter Länge, und das sind in den relevanten Gebieten nur sehr wenige.

»Es wird zwar verstärkt an selektiven Fangmethoden geforscht«, sagt Hubold, »in einer wirklich befriedigenden Form ist selektiver Fang aber kaum realisierbar.« Bedrohte und weniger bedrohte Fische der gleichen Größe, die im gleichen Lebensraum vorkommen, landen auch im gleichen Netz. Da helfen keine Vorschriften über die Maschengröße, selbst wenn die Fischer sie einhalten.

Zudem kann sich ein und dieselbe Fangmethode in der einen Region als schonend, in anderen als schädlich erweisen. Die Langleinenfischerei auf Tunfisch erzeugt kaum Beifang, wird sie aber in der Antarktischen See auf Schwarzen Seehecht angewandt, lassen zahlreiche Albatrosse ihr Leben.

In der Nordsee oder der Irischen See werden Plattfische vor allem mit Baumkurren gefangen. Wie einen Schlitten ziehen die Kutter diese Grundschleppnetze über den Meeresboden. Der Stahlrahmen, der die Netze offen hält, durchpflügt den Boden bis zu acht Zentimeter tief und legt dabei im Sediment lebende Organismen frei. Andere Arten werden zerquetscht oder verschüttet – in einigen Gebieten bis zu 50-mal im Jahr. »Andererseits überwiegt in der südlichen Nordsee ein reiner Sand- oder Schlammboden mit einer weit verbreiteten Fauna, die auf Veränderungen ihres Lebensraumes flexibel reagieren kann. Das ›Umpflügen‹ erhöht in diesen Gebieten die Produktivität der Bodenlebewesen, in der Folge können dort auch mehr Fische vorkommen«, erläutert Hubold. »Wir könnten darüber nachdenken, ob wir geeignete Teile des Meeres auf solche Art wie eine landwirtschaftliche Fläche intensiv nutzen und dafür andere Gebiete von der Nutzung generell ausnehmen wollen.«

Moderne Piraterie

Zur Verringerung des »Discards«, der wieder über Bord geworfenen Menge, schlägt Hubold staatliche Maßnahmen vor. Wenn die Fischer Beifang anlanden müssten, würden sie sich auch stärker bemühen, ihn zu reduzieren. Subventionierte Ankäufe und die Verwendung zur Fischmehlproduktion wären eine Möglichkeit, den Beifang in die Quoten zu bekommen, ohne die Fischer in den Ruin zu treiben. »Dabei dürfte sich das Geschäft natürlich nicht so sehr lohnen, dass der Beifang gezielt gefischt wird.«

Fernab der europäischen Fangzonen haben sich längst Nebenschauplätze der Schlacht um den Fisch entwickelt. Westafrikanische Gewässer sättigen zunehmend den europäischen Markt. Nun fischen europäische Flotten dort, wo die Menschen wegen Armut und Ernteausfällen an Land mehr als irgendwo anders auf proteinreiche Ernährung aus der lokalen Küstenfischerei angewiesen sind. Schon nimmt auch die Menge und Größe der aus diesen Gewässern angelandeten Fische ab.

Im laufenden Jahr zahlt die EU rund 200 Millionen Euro für Fischereiabkommen mit etwa 24 Drittländern, zumeist auf der Südhalbkugel. Der günstige Zugang zu deren Gewässern bedeutet für die europäischen Flotten eine starke Subvention, die den Preis der Ressource Fisch und damit ihren wirtschaftlichen Wert auch für die Einheimischen verringert.

Ursprünglich sollten die Devisen, die der Verkauf der Zugangsrechte den westafrikanischen Ländern bringt, die Versorgung der Bevölkerung verbessern: teurer Edelfisch in den Norden, minderwertiger Tiefkühlfisch in größerer Menge zurück in den Süden. Korruption und hohe Transportkosten führen jedoch dazu, dass die meisten dieser Länder mehr Fisch ausführen, als sie an gefrorenen Fischblöcken einführen können. Zusätzlich spezialisiert sich die Bevölkerung auf den Fang der teuren Exportfische. So bleibt für den einheimischen Markt nicht viel übrig, die Versorgung mit Fisch hat sich in manchen Regionen deutlich verschlechtert.

Andere europäische Schiffseigner ziehen unter Billigflaggen als Plage über die Meere, entziehen sich den Regeln zur Erhaltung der Fischbestände, missachten Sicherheitsvorschriften und Arbeitnehmerrechte und beuten skrupellos die letzten Fischgründe aus. Schon etabliert sich eine Fischmafia, die sowohl den Fang von als auch den Handel mit bedrohten Fischen organisiert.

Der Markt ist eine der zuverlässigeren Variablen in der Kette von Menschen, Zahlen und Fischen. Er unterstützt auch noch das Ausbeuten der letzten Bestände: Je seltener die Art ist, desto teurer wird sie gehandelt. Auf der anderen Seite führt die »legale Überfischung« auf Grund von Subventionen kaum zu Preissteigerungen. Der deutsche Konsument verzehrt pro Kopf und Jahr 14,4 Kilogramm der fettsäure- und proteinreichen Meerestiere, neben Hering und Makrele auch Arten, die im Meer bleiben sollten, wie Rotbarsch, Kabeljau und Dorsch. Liebevoll gestaltete Einkaufsführer der Umweltorganisationen Greenpeace und wwf könnten den Fischesser aufklären, was er mit besserem Gewissen essen kann. Auch von der Aquakultur könnte Entlastung für die Meeresfische kommen, vorausgesetzt, sie wird ökologisch verträglich und mit Pflanzen fressenden Arten betrieben.

Komplexe Zusammenhänge, schleichende Veränderungen

Selbst wenn sich irgendwann alle Fischereiminister dieser Welt samt ihren fischenden Landsleuten besinnen sollten – es würden genug Variable offen bleiben. Die Sollwerte einer »nachhaltigen Bewirtschaftung« mögen die Fischerei erhalten; ob sie der Forderung nach einem ökologischen Gleichgewicht gerecht werden, ist damit noch nicht gesagt. Eigenschaften wie Stabilität und Regenerationsfähigkeit sind in natürlichen Gemeinschaften kaum abschätzbar. Auch ohne den Eingriff des Menschen unterliegen Fischbestände häufig heftigen Schwankungen, zum Beispiel weil sie im Rhythmus der Jahreszeiten zu- und abnehmen, großräumig wandern oder von natürlichen Umweltveränderungen betroffen sind. Diese Veränderungen von den Auswirkungen der Fischerei abzugrenzen ist schwierig bis unmöglich.

Zunehmend schielt die Fischerei nach noch ungenutzten Fischarten, um die Löcher in den Fangquoten zu stopfen. Unter den angelandeten Fischen hat sich der Anteil von Arten der Tiefsee und der Korallenriffe in den letzten Jahren vervielfacht. Die meisten dieser Arten sind aber schon auf Grund ihrer Lebensweise oder ihres langen Lebenszyklus nicht nachhaltig befischbar. Tiefseefische entwickeln sich nur langsam und sind somit kaum produktiv: Der Atlantische Sägebauch kann 150 Jahre alt werden und ist erst mit einem Alter von 25 Jahren geschlechtsreif. Besonders in den Korallenriffen ist die ökologische Funktion einzelner Arten erst in Ansätzen erforscht.

»Das Wegfangen großer Mengen von Raubfischen wie Kabeljau und Makrele in der Nordsee hat mit Sicherheit Folgen für das System«, sagt Hubold. »Aber wir gehen nicht von systembedrohenden oder irreversiblen Veränderungen aus,

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

denn bisher kam es weder zu erkennbaren Artenverschiebungen noch zu Massensterben.« Nur selten sind die ökologischen Folgen so offensichtlich wie bei der destruktiven Fischerei, die mit Dynamit oder Gift vor allem in tropischen Ländern ganze Ökosysteme des Meeresgrundes zerstört, oder den Schleppnetzen, die lokal vollständige Lebensgemeinschaften abernten.

Es finden eher schleichende Veränderungen statt, die erst auf den zweiten Blick zu erkennen sind. Daniel Pauly kann die Effekte des Wegfangens der jeweils größten Fischarten bereits in allen Weltmeeren, besonders aber auf der Nordhalbkugel, nachweisen. Es führt zu einer Verkürzung der Nahrungskette (»fishing down the foodweb«), indem Räuber auf immer kleinere Beuteorganismen ausweichen. Je keiner die Organismen, desto kürzer sind ihre Lebenszyklen und desto stärker wird ihre Anzahl vom Klima und von den Jahreszeiten beeinflusst. Die gesamte Gemeinschaft wird anfälliger für Umweltveränderungen. Solche Zusammenhänge sind nur selten nachweisbar.

Ohne Zweifel produzieren Fischpopulationen mehr Nachwuchs, als zur Bestandserhaltung unter normalen Bedingungen nötig scheint. Man geht bis heute davon aus, dass dieser »Jahrgangsüberschuss« ohne ökologische Folgen abgefischt werden kann. Bei widrigen Umweltbedingungen hängt aber möglicherweise das Überleben des Bestands an diesen überzähligen Individuen.

So ist vermutlich auch die dramatische Entwicklung der Kabeljaubestände in der Nordsee zu erklären. Der Meeresbiologe Grégory Beaugrand von der Universität Lille (Frankreich) und seine Kollegen entdeckten, dass die Fische zusätzlich unter ihrer Umwelt zu leiden hatten: Durch die seit Mitte der 1980er Jahre steigenden Temperaturen in der Nordsee veränderte sich die Zusammensetzung des Planktons. Insbesondere nahm die Anzahl bestimmter Ruderfußkrebse, von denen sich die Larven des Kabeljaus vorzugsweise ernähren, stark ab. Die Fische mussten mit anderen, weniger nahrhaften Arten vorlieb nehmen. Gleichzeitig kurbelten steigende Temperaturen im Atlantik den Stoffwechsel der Fische an. Durch höheren Energieverbrauch bei verminderter Nahrungsaufnahme legten die Kabeljaularven langsamer an Gewicht zu, und ein größerer Anteil von ihnen ging zu Grunde.

Das Zusammentreffen von Missständen ist wenig kalkulierbar. Die Überfischung zwar der wesentliche, aber nicht der einzige Faktor, der die Bestände dezimiert. Dies wird bei Arten wie Lachs oder Aal deutlich, die einen Teil ihres Lebens im Süßwasser verbringen und dort noch stärker menschlichen Störungen ausgesetzt sind. Seit Jahren nimmt die Zahl der Aallarven ab, die aus der Sargassosee an die europäischen Flussmündungen zurückkehren. Die vergleichsweise wenigen Tiere, die schließlich als ausgewachsene Individuen aus den Flüssen abwandern, fallen zu Hunderttausenden Staustufen und Turbinen zum Opfer. Zusätzlich dezimiert seit einigen Jahren eine Schwimmblasenkrankheit die erwachsenen Aale. »Das gesamte Problem hängt auch mit der Nutzung der Aallarven durch den Menschen zusammen«, berichtet Hubold. Diese werden nämlich bereits auf dem Hinweg in den Flussmündungen abgefangen und als »Glasaale« zum Verzehr vermarktet oder in Aquakultur genommen.

Wenig wissen die Wissenschaftler darüber, ob der Verlust an genetischer Vielfalt innerhalb der Populationen deren Anpassungs- und Überlebensfähigkeit beeinflusst. Wissenschaftliche Gutachten empfehlen für 28 europäische Bestände mit insgesamt zwölf Arten eine »Wiederauffüllung«. Möglicherweise stellt aber selbst das wünschenswerte Anwachsen der Bestände nur eine halbe Wiedergutmachung dar, wenn die Populationen genetisch verarmt sind.

Der Beifang, der mehr tot als lebendig wieder über Bord geworfen wird, taucht in der Statistik nicht auf.

Wer zu spät laicht, stirbt aus

Untersuchungen des Biologen Esben Olsen vom Internationalen Institut für angewandte Systemforschung im österreichischen Laxenburg und seiner Kollegen aus Norwegen und Kanada ergaben, dass der Kabeljau vor der kanadischen Ostküste gegen Ende der 1980er Jahre bereits mit fünf statt mit sechs Jahren geschlechtsreif wurde. Die starke Befischung hatte Tieren, die früher laichten, einen Vermehrungsvorteil verschafft. Dabei sind eigentlich die älteren und damit größeren Fischweibchen im Vorteil: Sie ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Im Rahmen einer Greenpeace-Kampagne werden am 17. August 2004 Tausende kleiner Meerestiere auf einem hundert Meter langen Tisch in Berlin ausgebreitet – nur ein geringer Teil dessen, was auf einem Kutter binnen zwei Stunden als Abfall aussortiert wurde.

haben eine höhere Fruchtbarkeit, verteilen ihren Laich räumlich und zeitlich besser und produzieren größere Eier und damit Larven mit besseren Überlebenschancen. Der Eingriff durch die Fischerei beeinflusst somit indirekt die genetische Fitness der Population.

Eine Erholung ist noch möglich

Bevor ein Meeresfisch ausstirbt, muss schon einiges geschehen. »Das Zusammenbrechen eines Bestands bedeutet nicht, dass er am Rande der Ausrottung steht, sondern dass er wirtschaftlich nicht mehr produktiv ist«, erklärt Hubold. »Bei den traditionell befischten Arten mit ihrer außergewöhnlich starken Reproduktionskraft bleiben auch bei Überfischung Millionen von Individuen. Erst wenn die gezielt weiter befischt werden, gerät die Art an ihre biologischen Grenzen.« So bleibt Hubold optimistisch, dass es nicht zu spät ist für eine Erholung der Bestände – wenn gehandelt wird. »Ich kann noch ruhig schlafen, weil ich trotz aller Missstände noch keine Gefährdung der Biodiversität im Meer sehe. Wir haben in Europa eine gute Forschungslandschaft, wir haben Strukturen, um ein entsprechendes Management einzurichten, und die Kontrollmechanismen, es durchzusetzen. Zusätzlich existiert heute eine interessierte Öffentlichkeit, die politischen Druck ausüben kann. Damit haben wir alle Werkzeuge für eine nachhaltige Fischerei in der Hand.«

Wenn man ein Drittel eines Meeresgebietes sperrt, so fanden Wissenschaftler heraus, können sich die Fischbestände so weit erholen, dass sie die umliegenden Gebiete ausreichend neu besiedeln. Mehr noch, die Produktivität dieser Gebiete steigt enorm. Auch Europa will in den kommenden Jahren einen Teil der Meere im Rahmen des Netzwerks »Natura 2000« unter Schutz stellen. Deutschland hat bereits im Mai seine Vorschläge in Brüssel eingereicht. Sie umfassen 30 Prozent der deutschen 200-Meilen-Zone in der Nord- und Ostsee.

Die Errichtung von globalen Meeresschutzzonen, so segensreich sie sein mögen, wird allerdings ohne eine weltweite Reduktion der Flotten zu einer Konzentration der Fischerei in den verbliebenen Fischfangzonen führen. Vor allem die Hoheitsgebiete ärmerer Länder würden dann vermutlich noch stärker übernutzt, als das jetzt bereits der Fall ist. Deshalb führt kein Weg an einem Fischereimanagement vorbei, das alle Belange des Ökosystems mit berücksichtigt.

Angesichts der komplexen Vorgänge in den Meeren, des noch großen Unwissens und der bürokratischen Mühlen, die nicht nur in Brüssel langsam mahlen, scheint solch ein ökosystemisches Fischereimanagement allerdings noch in weiter Ferne zu liegen.

Bis es so weit ist, könnten die vielen Unbekannten unter den Wellen für Überraschungen sorgen. Die Überdüngung und Schadstoffbelastung der Meere, klimatische Veränderungen und weit gehend unerforschte Eingriffe in die Meeresumwelt, beispielsweise die Verteilung von hormonell wirksamen Substanzen wie Phthalaten (Weichmachern), könnten irgendwann zur ökologischen Katastrophe führen. Schon heute treibt im Nordpazifik ein Teppich aus Plastikmüll von der Größe Mitteleuropas.

Auf der anderen Seite steht die erstaunliche Anpassungsfähigkeit der Natur. Sie findet bisweilen Lösungen, die einem aufrechten Ökologen nicht in den Sinn kämen. Ausgerechnet um Bohrinseln stieg die Artenvielfalt explosionsartig an, weil Meeresorganismen am Betonsockel ein willkommenes Siedlungsareal fanden. Auch die ökologisch umstrittenen Windkraftwerke in küstennahen Gewässern bieten Fischen ein Rückzugsgebiet, da sie für Fischer unzugänglich sind. Doch können diese versehentlichen Nebeneffekte nicht darüber hinwegtäuschen, dass solche Nischen nur Asyle sind für die Fantasie der Natur. Denn der Reichtum der Meere hat sich erschöpft. Ihn wieder aufzubauen verlangt nach anderem als dem Zufall und einer Natur im Exil.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Antje Kahlheber ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Dynamik der Überfischung. Von R. Froese und D. Pauly, in: Warnsignale aus Nordsee und Wattenmeer. Von J. Lozán et al. (Hg.). J. L. Lozán, Hamburg 2003

Western Africa: a fish basket of Europe past and present. Von J. Alder und U. R. Sumaila, in: Journal of Environment & Development, Bd. 13, Nr. 2, S. 156, 2004

Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. Von Ransom Myers und Boris Worm, in: Nature, Bd. 423, S. 280, 2003

Whales before whaling in the North Atlantic. Von Joe Roman und Stephen Palumbi, in: Science, Bd. 301, Nr. 5632, S. 508, 2003

Counting the last fish. Von D. Pauly und R. Watson, in: Scientific American, Juli 2003, S. 42

Weblinks und weitere Literaturhinweise zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das Wunder der über 120-Jährigen

Dem Altern liegen bei allen Lebewesen gewisse gemeinsame Prinzipien zu Grunde. Damit zeichnen sich Möglichkeiten ab, das menschliche Leben zu verlängern – falls dies denn wünschenswert ist.

Von Shino Nemoto und Toren Finkel

Die Französin Jeanne Calment wurde im August 1997 in einer schlichten Zeremonie beerdigt. Die Grabredner betonten einhellig, dass ihr Leben wenig Außergewöhnliches enthielt – wäre da nicht ihr Geburtsdatum: 21. Februar 1875. Fünf Jahre zuvor war Napoleon III. gestürzt und die dritte französische Republik ausgerufen worden. In ihrer Heimatstadt Arles begann der Impressionismus zu blühen. Jahrzehnte später erzählte die Greisin Besuchern, sie erinnere sich gut an Vincent van Gogh, der ihr »ungewaschen und schlecht gekleidet« erschien. Fragte man sie nach dem Geheimnis ihrer Langlebigkeit, meinte sie, sie habe immer große Mengen Olivenöl und Portwein konsumiert und das Rauchen rechtzeitig aufgegeben – dies allerdings erst im Alter von 119 Jahren.

Versicherungsgesellschaften interessieren sich seit jeher für die Lebenserwartung ihrer Klientel. Naturwissenschaftler hingegen haben diesem Themenkreis lange Zeit kaum Beachtung geschenkt. Zwar widmeten sie sich eingehend den Prozessen, die das Leben hervorbringen und ihm ein Ende setzen. Welche Faktoren aber bestimmen, wie schnell ein Organismus die Spanne dazwischen durchmisst, haben sie erstaunlich wenig untersucht. Altern galt als ein Prozess, der im Gegensatz zu anderen biologischen Phänomenen nur schwer in experimentell bearbeitbare Teilaspekte zu zerlegen ist. In den letzten zehn Jahren haben jedoch einige beharrliche Forschungsgruppen diese Ansicht zum Bröckeln gebracht. Wenn auch ihre Arbeiten noch kein vollständiges Bild ergeben, zeichnet sich doch erstmals ab, welche molekularen Regelkreise die Lebensspanne eines Organismus determinieren.

Zu den Studienobjekten gehört die Hefe. Auf den ersten Blick erscheint sie kaum geeignet, etwas über das menschliche Altern zu erfahren. Den einzelligen Sprosspilzen, bekannt etwa als Bäcker- und Bierhefe, mangelt es augenscheinlich an Komplexität und höheren Funktionen, die wir mit Phänomenen wie dem Altern assoziieren. Tatsächlich hat sich aber die so genannte replikative Lebensspanne – gemessen wird hierfür, wie oft eine Hefemutterzelle Tochterzellen produzieren kann – als nützliches Modellsystem für Alterungsprozesse bei Säugetieren erwiesen. Die asymmetrische Teilung, bei der eine kleinere Tochterzelle abgeschnürt wird, erfolgt bei jungen Mutterzellen rasch und problemlos. Später, nach etlichen solcher »Knospungsrunden«, legt die Mutter an Umfang zu, während ihre Fähigkeit zur Reproduktion schwindet. Hefen wie Menschen sind also im mittleren Alter meist langsamer, schwerer und an der Fortpflanzung weniger interessiert. Dies bietet einen ersten, wenn auch recht allgemeinen Fingerzeig, dass sich bestimmte biologische Aspekte des Alterns – und damit vielleicht auch die zu Grunde liegenden Mechanismen – im Laufe der Evolution wenig verändert haben. Fachleute sprechen von konservierten Merkmalen.

Wovon also hängt es ab, wie oft sich eine Hefezelle teilen kann? Etliche milieu-



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Die Französin Jeanne Calment starb mit 122 Jahren. Das Rauchen hatte sie erst mit 119 aufgegeben.**

bedingte und genetische Faktoren sind inzwischen bekannt. Zu den Umweltfaktoren gehören einige Formen von nicht lebensbedrohlichen Belastungen, etwa die Reduktion des Traubenzuckergehalts im Nährmedium von zwei auf ein halbes Prozent. Eine solche stark kalorienreduzierte Diät kann die replikative Lebensspanne einer Hefezelle deutlich verlängern. Dass »weniger mehr ist«, wenn es um Kalorien und Langlebigkeit geht, haben Forscher bei den verschiedensten Organismen von Hefen bis Mäusen immer wieder beobachtet.

Die Verlängerung der Spanne durch knappe Glucosezufuhr wird bei Hefen über ein bestimmtes Gen vermittelt. Interessanterweise tritt der Effekt auch bei normal genährten Hefezellen auf, die ein gentechnischer Eingriff einfach nur veranlasst, übermäßig viel von dem zugehörigen Protein zu produzieren. Es trägt das Kürzel Sir2, für englisch *silent information regulator 2*. Seine zuerst entdeckte Aufgabe besteht darin, andere Gene durch Verändern des physikalischen Zustands der DNA gewissermaßen leiser zu stellen. Fachleute nennen dies Gen-Silencing. Inzwischen stützen die meisten Indizien die Vorstellung, dass das Protein Sir2 die Lebensspanne der Hefezellen verlängert, indem es andere Gene reguliert oder die DNA-Rekombination – den Austausch von DNA-Abschnitten zwischen verschiedenen Chromosomen – hemmt. Seine dafür relevanten Zielgene sind jedoch noch unbekannt.

Was aber hat eine Kalorienrestriktion mit dem Molekül zu tun? Der Eiweißstoff entfernt bestimmte Acetylgruppen von Histonen und anderen Proteinen, die der Verpackung der Erbsubstanz DNA dienen. (Dieses Abstrippen drosselt gewöhnlich die Aktivität benachbarter Gene.) Seine eigene Wirksamkeit wiederum hängt vom Angebot an einer Substanz namens Nicotinamid-adenin-dinucleotid ab. NAD – so die Abkürzung – und seine chemisch reduzierte Form NADH stellen eine Art Basiswährung im Energiehaushalt der Zellen dar. Eine stark verringerte Kalorienzufuhr könnte die Aktivität des Sir2-Proteins auf zweierlei Weise beeinflussen: indem sie entweder das Verhältnis von NAD zu NADH in der Zelle verändert oder die Konzentration an Nicotinamid, einem Baustein der beiden.

Bei der Taufliege *Drosophila melanogaster* dürfte Schmalkost nicht nur die enzymatische Aktivität des Proteins steigern, sondern auch seine Konzentration. Beides würde dann die Genexpression und die DNA-Rekombination drosseln und damit – auf noch ungeklärte Weise – die Lebensspanne verlängern.

Auch dem winzigen Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* verhelfen Überdosen von Sir2 zu hohem Alter. Wie Hefe ist er ein wichtiger Modellorganismus der Alternsforschung. Das hat mehrere Gründe:

- Junge und alte Würmer unterscheiden sich durch ihr Aussehen und Verhalten voneinander (siehe Abbildung S. 73),
- die normale Lebensspanne liegt mit 20 bis 25 Tagen in einem experimentell überschaubaren Rahmen,
- das Genom ist vollständig entziffert,
- in die Gene lassen sich ziemlich leicht Mutationen einbringen, um die Auswirkungen zu untersuchen,
- und schließlich kann die Ausprägung einzelner Gene einfach durch so genannte RNA-Interferenz beeinflusst werden.

Dabei handelt es sich um eine Technik, die den Schritt zwischen dem Ablesen der DNA-Information und der Herstellung des darin verschlüsselten Proteins unterbricht. Sie fängt die RNA-Abschriften der Gene ab.

Im letzten Jahrzehnt förderten Mutationsanalysen zahlreiche weitere Gene zu Tage, die für sich genommen die Lebensspanne des »eleganten« Würmchens beeinflussen. Viele davon scheinen in Stoffwechselaspekte einzugreifen.

Genetisch auf Schmalkost gesetzt

Einige der langlebigeren Fadenwurmmutanten haben beispielsweise Schwierigkeiten bei der Nahrungsaufnahme und sind daher schon genetisch auf Schmalkost gesetzt. Eine andere langlebige Mutante namens clk-1 vermag kein Coenzym Q zu erzeugen. Die organische Substanz ist Teil des Räderwerks zur Energiegewinnung in den Zellkraftwerken, den Mitochondrien.

Eine interessante Gruppe von Mutationen betrifft eine Signalkette, die von Molekülen wie dem Hormon Insulin oder dem insulinartigen Wachstumsfaktor 1 (IGF-1) angestoßen wird. Die gut untersuchte molekulare Kaskade kommt bei ganz verschiedenen Organismen vor, wo sie am Messen des Nährstoffangebots und an der Stoffwechselregulation mitwirkt. Der Weg des Signals von der Zelloberfläche bis zum Zellkern mündet in ein Protein, das die Expression – die Ausprägung von Genen – reguliert. Bei langlebigen Würmern, die Mutationen in Genen für Komponenten dieser Signalkette aufweisen, kann dieses Protein namens DAF-16 etwas stärker im Zellkern aktiv sein. Der Grund: Der Eiweißstoff wird schlechter im Zellplasma zurückgehalten ▷

IN KÜRZE

- **In den letzten zehn Jahren** konnten Forscher ein erstes Bild der molekularen Regelkreise erarbeiten, welche die **Lebensspanne von Organismen** bestimmen.
- Nach Ansicht der Autoren sind so genannte **freie Radikale**, die im Zellstoffwechsel als **Abfallprodukt** entstehen, ein Dreh- und Angelpunkt. Viele alterungsassoziierte Gene greifen letztlich in das Erzeugen oder umgekehrt in das Abfangen dieser Radikale ein.

(siehe Diagramm S. 74). An der Identifikation seiner Zielgene wird gearbeitet. Zwei Forschergruppen stießen mit verschiedenen Methoden unter anderem auf Gene, die offenbar an der Regulation des Stoffwechsels und der Reaktion auf so genannten oxidativen Stress beteiligt sind. Bei Stoffwechselprozessen beispielsweise entstehen »freie Radikale« als Abfallprodukt in der Zelle. Sie schützt sich vor diesen reaktionsfreudigen Sauerstoffspezies oder Oxidantien mit eigenen Antioxidantien. Ein Zuviel an Radikalen oder ein Zuwenig an Radikalfängern bewirkt oxidativen Stress. Bei Säugetieren fördern die Pendants zu DAF-16 das Ablesen ähnlicher Stressabwehrgene.

Mutationsstudien an einzelnen Erbfaktoren sind ein zwar effektiver, jedoch eng fokussierter Ansatz zur Untersuchung genetischer Zusammenhänge. Einen höheren Durchsatz erlaubt die RNA-Interferenz. Um ein möglichst breites Spektrum von Genen zu erfassen, die an der Regulation von Alterungsprozessen beteiligt sind, hat eine der Forschergruppen mit ihr mehr als 5000 Erbfaktoren des Fadenwurms jeweils geknebelt. Dabei ergab sich ein bereits bekanntes Bild: Die größte Klasse an Genen und damit an Proteinen, deren praktisch verhinderte Produktion die Lebensspanne verlängerte, umfasst Regulatoren der Mitochondrienfunktion. Auch die Inaktivierung bestimmter Komponenten der mitochondrialen Elektronentransportkette, einer zentralen Schrittfolge des Energie liefernden Stoffwechsels, verlängert das Leben – merkwürdigerweise jedoch nur, wenn die Funktion im Jungtier reduziert wird.

Nach vorläufigen Schätzungen auf Basis dieser Studien dürfte etwa eines von fünfzig beliebigen Genen die Lebensspanne verlängern – wenn man es inaktiviert. Umgekehrt heißt das: Normalerweise verkürzen solche Erbfaktoren das Leben. Doch weshalb sind sie dann in der Evolution des Fadenwurms – und vermutlich vieler anderer Tierarten – erhalten geblieben? Nach gängiger Vorstellung ist das einzige Selektionskriterium für ein Gen seine Fähigkeit, die Reproduktionsrate seines Trägers zu verbessern. Lebensverkürzende Gene müssten also jungen Tieren irgendeinen Fortpflanzungsvorteil bieten. Wie schon Darwin spekulierte, sind Individuen jenseits des fortpflanzungsfähigen Alters für eine Spezies ohnehin kaum noch von Nutzen, was übrigens besonders für Eltern von Teenagern keine neue Erkenntnis sein dürfte.

Gentechnisch »unsterblich« gemacht

Alterungsphänomene lassen sich auch an Zellkulturen studieren. Wie Hefezellen verlieren normale Körperzellen von Säugetieren gewöhnlich nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen ihre Teilungsfähigkeit, wenn man sie in Kultur züchtet. Dieses Phänomen wird nach seinem Entdecker als Hayflick-Limit bezeichnet. Mit jeder Teilungsrunde steigt der Anteil der Zellen, die in das Stadium der so genannten Seneszenz eintreten und sich nicht mehr vermehren.

Doch welcher Mechanismus bestimmt die Hayflick-Grenze? Bei menschlichen Zellen zum Beispiel ist zu beobachten, dass sich die Telomere – Schutzkappen an beiden Enden der Chromosomen – bei jedem Teilungszyklus verkürzen. Sinkt die Telomerlänge unter einen bestimmten Schwellenwert, kann dies die Seneszenz einleiten. Gewöhnliche Körperzellen lassen sich »unsterblich«, also unbegrenzt teilungsfähig machen, wenn eine gentechnische Manipulation es ihnen ermöglicht, dauerhaft das Enzym Telomerase zu erzeugen. Dessen Funktion besteht darin, verkürzte Schutzkappen wiederherzustellen. Die Immortalität von Krebszellen sowie embryonaler und adulter Stammzellen dürfte damit zusammenhängen, dass sie das Enzym kontinuierlich fertigen. Eine erzwungene Produktion in den Körperzellen eines Erwachsenen könnte womöglich den alterungsbedingten Niedergang umkehren oder zumindest verlangsamen. Kritiker warnen jedoch, dies müsse vermutlich mit einer drastisch erhöhten Krebsrate erkauft werden – ein sicher inakzeptabler Preis.

Die Lebensspanne kultivierter Zellen lässt sich durch weitere Manipulationen beeinflussen. Zum Beispiel verzögert eine verringerte Sauerstoffkonzentration im Medium die Seneszenz. Umgekehrt fördert das so genannte *RAS*-Gen, das die replikative Lebensspanne von Hefen reguliert, auch bei Säugetieren die Seneszenz von Körperzellen. Es trägt die Bauanweisung für ein Schaltprotein. So genannte onkogene Mutationen darin sind eng mit einer Umwandlung bereits unsterblicher Säugerzellen in Tumorzellen verknüpft. Paradoxerweise wird in normalen Zellen im Falle derselben Mutationen letztlich die Teilung irreversibel blockiert. Dies stützt die These, dass die Seneszenz wie die Apoptose – ein Selbstmordprogramm, durch das sich beispielsweise geschädigte Zellen selbst eliminieren – als Schutzmechanismus gedacht ist.

Sowohl in Hefen als auch in Säugerzellen sorgt das *RAS*-Gen interessanterweise dafür, dass ein hoher Pegel an reaktiven Sauerstoffspezies in den Mitochondrien entsteht. Deren Gegenwart ist übrigens bei menschlichen kultivierten Zellen zur Induktion der Seneszenz erforderlich.

Über das Altern von Säugetieren ist zwar viel weniger bekannt, doch zeigen sich zahlreiche Parallelen zu einfachen Organismen und kultivierten Zellen. Zum Beispiel existieren mehrere genetisch unterschiedliche Stämme von langlebigen Mäusen, die sich durch einen Mangel an Hormonen wie dem Wachstumshormon und IGF-1 auszeichnen. Dieses Muster erinnert zumindest entfernt an die langlebigen Fadenwürmer mit reduzierter Signalübertragung an betreffender Stelle. Mäuse mit beispielsweise einem partiell inaktivierten IGF-Rezeptor haben eine um 20 Prozent längere Lebensspanne. Gleiches gilt, wenn ihr Insulinrezeptor nur in Fettzellen inaktiviert ist. Eine ähnliche Gewebespezifität zeigte sich auch bei *C. elegans*. Die Würmer profitieren schon, wenn nur in wenigen Geweben das DAF-16-Protein verstärkt agiert.

Ein weiterer Regulator der Langlebigkeit von Säugetieren trägt das Kürzel

Bewegung erhöht die Lebenserwartung – künftige Medikamente sollen dies auch können.

$p66^{shc}$. Das Protein stellt eine wichtige Komponente in einer intrazellulären Signalkette dar. Entfernt man sein Gen bei Mäusen, verlängert sich ihre Lebensspanne um grob 30 Prozent. Wie viele der langlebigen Wurm-Mutanten sind auch diese Mäuse widerstandsfähiger gegen oxidativen Stress als ihre normalen Geschwister. Zudem enthalten ihre Zellen weniger freie Radikale.

Interessanterweise scheint das Protein die Aktivität eines anderen Eiweißstoffes zu regulieren, der wie das DAF-16-Protein des Fadenwurms zur so genannten Forkhead-Familie gehört und dieses in Säugern vertritt. Anfang des Jahres berichteten Forscher, dass Forkhead-Proteine von Säugern physikalisch und funktionell auch mit den Enzymen aus der Sir2-Familie interagieren, die Acetylgruppen abspalten und von NAD abhängen. Trotz ihrer evolutionären Distanz haben also Fadenwürmer und Säugertiere offenbar einige wesentliche Gemeinsamkeiten.

Eine weitere Möglichkeit, Alterungsprozesse zu ergründen, bieten DNA-Chips. Damit lässt sich analysieren, welche Gene in einem jungen und welche in einem gealterten Gewebe wie stark aktiv sind. Nur an ihnen entstehen Boten-RNA-Moleküle als mobile Bauanweisung für die Proteinfabriken. Die verschiedenen Boten-RNAs der Zellen lagern sich an passende DNA-Schnipsel an, die als feines Mikroraster auf dem Chip angeordnet sind.

Ersten Studien zufolge ähneln sich junges und altes Gewebe erstaunlich im Expressionsniveau: Nur etwa ein bis zwei Prozent der RNAs unterscheiden sich im Gehalt um mehr als das Doppelte, vergleicht man Muskelgewebe alter und junger Mäuse. Gleiches gilt für das Hirngewebe. Wer also einer zwangsweisen Versetzung in den Ruhestand entgehen möchte, könnte argumentieren, dass er auf zellulärer Ebene wohl noch mindestens 98 Prozent der Effektivität jüngerer Mitarbeiter besitzt. Allerdings fallen die wenigen Gene, deren Expression mit dem Alter variiert, vor allem in Funktionsklassen, die Reaktionen auf oxidativen Stress, Entzündungsreaktionen und allgemeine Stoffwechselprozesse regulieren. Diese Aktivitätsunterschiede traten bemerkenswerterweise nicht auf, wenn die Tiere auf Schmalkost gesetzt waren.

Ob Altern und Langlebigkeit bei Menschen durch eine langfristige stark

Leben und Sterben eines Wurms

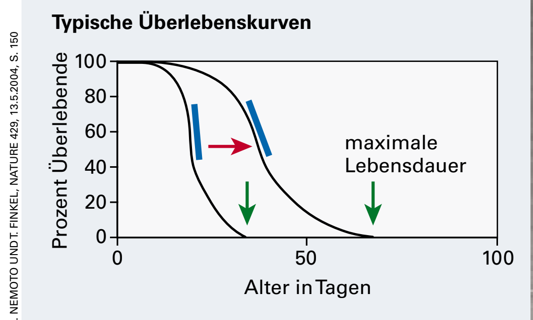
Der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* ist ein beliebtes Studienobjekt der Alternsforschung. Er wird im Schnitt rund drei Wochen alt. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen ihn als »Baby«, jugendliches und erwachsenes Tier. Ihnen überlagert ist die zunehmende »Autofluoreszenz« des Wurms in den verschiedenen Lebensstadien. Hervorgerufen wird sie vermutlich durch oxidierte Zellbestandteile, die sich nach und nach anreichern.







Die Kurven zeigen, wie mit zunehmendem Alter der Anteil überlebender Individuen sinkt. Beide Populationen beginnen mit frisch geschlüpften Würmern. Das Gefälle der Kurven, angedeutet durch die blauen Balken, entspricht der jeweiligen Mortalitätsrate. Es gibt Gene, die nach Mutation oder Inaktivierung die maximale Lebensspanne verlängern und vermutlich dabei auch die Mortalitätsrate verändern. Dadurch verschiebt sich die Kurve nach rechts (roter Pfeil).



S. NEMOTO UND T. FINKEL, NATURE 429, 13.5.2004, S. 150

kalorienreduzierte Diät beeinflusst werden könnten, ist nicht bekannt. Verständlicherweise finden sich auch kaum Probanden für ein entsprechendes lebenslanges Experiment. Was das Altern anbelangt, lieferten erbliche Erkrankungen, die mit einer vorzeitigen Vergreisung einhergehen, weiteren Einblick. Am bekanntesten ist das Werner-Syndrom: Die Betroffenen bekommen schon früh beispielsweise Osteoporose, Arteriosklerose und Krebs, ihr Haar ergraut und wird schütter.

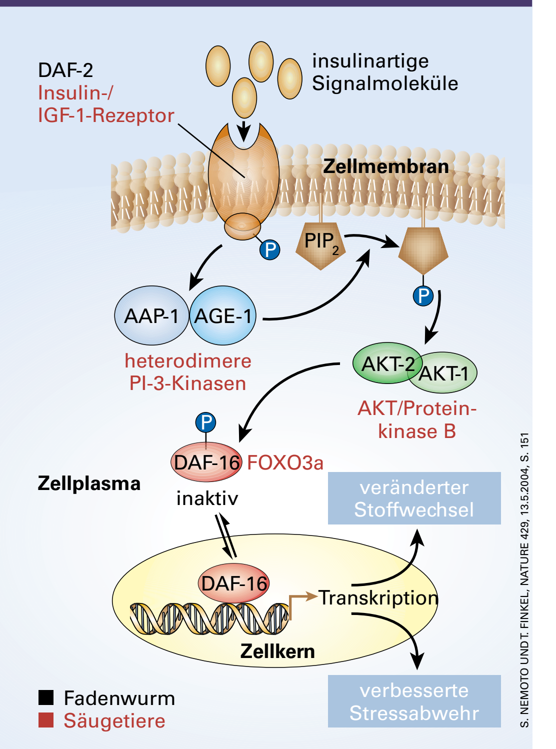
Gewebe altern verschieden schnell

Das betreffende defekte Gen trägt die Bauanweisung für eine DNA-Helicase. Andere Mitglieder dieser Enzymfamilie stehen im Zusammenhang mit gewissen Krebsveranlagungen, wenn erblich bedingt ihre Funktion beeinträchtigt ist. Solche Enzyme spielen normalerweise offenbar bei der Verdopplung, Reparatur und Rekombination der DNA eine Rolle.

Vorzeitiges Vergreisen wie beim Werner-Syndrom macht einen wesentlichen Unterschied zu einfacheren Organismen deutlich: Menschen sterben zumeist an definierten Erkrankungen und Ereignissen, während die Todesursachen niederer Organismen weniger klar zu benennen sind. Lehren uns die Erkenntnisse über biologische Signalwege, welche die Alterung regulieren, irgendetwas über die Mechanismen hinter altersbedingten Erkrankungen? Würde etwa ein Wundermittel, das den Alterungsprozess verlangsamt, zugleich die Häufigkeit von Erkrankungen wie Arteriosklerose und Krebs vermindern, die mit dem Alter so dramatisch steigt?

Im Zusammenhang mit Krebs gibt eine im letzten Jahr veröffentliche Untersuchung am Erbgut von Hefezellen viel- ▷

Ein Protein im Visier



Die Lebensspanne des Fadenwurms wird unter anderem durch eine komplexe biochemische Signalkette reguliert, welche die Aktivität des Proteins DAF-16 beeinflusst. Es wirkt als Transkriptionsfaktor, steuert also andere Gene.

Der vereinfacht dargestellte Weg beginnt mit insulinartigen Molekülen, die an der Außenseite der Zellen ankommen. Wenn sie an einem Rezeptor namens DAF-2 andocken, aktiviert dies im Zellinneren ein Enzymkaskade: AAP-1-AGE-1 (violett/hellblaue Ovale) überträgt Phosphatgruppen (P) auf Phosphatidylinositol-4,5-diphosphat (PIP_2, braune Fünfecke), das wiederum AKT-1-AKT-2 (grün) aktiviert. Dieses Enzym phosphoryliert schließlich DAF-16, das dadurch nicht in den Zellkern gelangen kann.

Einige Mutationen, die mit einer Verlängerung der Lebensspanne einhergehen, erhöhen bei erwachsenen Würmern etwas die Zahl der im Kern lokalisierten DAF-16-Moleküle. Dadurch kann das Protein die Gene, die es reguliert, stärker ansprechen. Dabei handelt es sich um Gene, die insbesondere in den allgemeinen Stoffwechsel oder in die Stressadaptation involviert sind. Ein ähnlicher Signalweg findet sich bei Taufliegen. Die nächstverwandten Schlüsselmoleküle bei Säugern sind rot abgesetzt.

▷ leicht gewisse Fingerzeige: Nachkommen von älteren Mutterzellen sind genetisch hundertfach instabiler als solche von jüngeren Mutterzellen. Falls Ähnliches für menschliche Zellen gilt, sind die Krebsentstehung und die Mechanismen des Alterns möglicherweise untrennbar verbunden.

Was andere Erkrankungen anbelangt, so sinkt beim Menschen mit fortschreitendem Alter die Zahl im Blut zirkulierender Vorläuferzellen, die der Reparatur der innersten Wandschicht von Blutgefäßen dienen. Bei Mäusen wiederum ist zu beobachten, dass Vorläuferzellen der Skelettmuskulatur sich immer weniger teilen und immer schlechter geschädigte Areale reparieren können. Der Niedergang ist markant. Anscheinend altern verschiedene Gewebe unterschiedlich schnell. Die Erschöpfung oder Seneszenz von Vorläuferzellen (darunter auch Stammzellen) könnte sowohl zum allgemeinen Alterungsprozess als auch zu altersbedingten Erkrankungen beitragen. So betrachtet ließen sich Arteriosklerose, neurodegenerative und einige andere Erkrankungen als eine Art gewebespezifische vorzeitige Vergreisung auffassen.

Während des Wahlkampfs um die Präsidentschaft der Vereinigten Staaten 1992 bewegten die Wählerschaft vor allem ökonomische Themen. In ihrer Wahlkampfzentrale hatten die Unterstützer von Bill Clinton ein Banner mit dem inzwischen berüchtigten Satz aufgehängt: »It's the economy, stupid!« (Um die Wirtschaft geht's, Dummkopf!). Unserer Meinung nach ist das adäquate Banner für eine Zentrale der Altersforschung zurzeit: »Die freien Radikale sind's, Dummkopf!«

Gegen freie Radikale

Tatsächlich sind die zellulären Effekte freier Radikale die derzeit beste Erklärung für den Alterungsprozess bei einer Vielzahl von Spezies. Kurzgefasst besagt diese Vorstellung: Wenn die mitochondriale Stoffwechselrate mit steigendem Nährstoff- und Sauerstoffangebot zunimmt, entstehen als Nebenprodukte auch mehr reaktive Sauerstoffverbindungen – mit entsprechenden schädlichen Auswirkungen auf die Zellen.

Eine solche Theorie wurde zwar bereits vor fast fünfzig Jahren formuliert, das heutige Modell ist jedoch differenzierter (siehe Kasten rechts oben). Zum Beispiel zeichnet sich zunehmend ab, dass die Produktion reaktiver Sauerstoffspezies in der Zelle genauestens reguliert ist und dass die Effekte dieser Oxidantien nicht nur in zufällig verteilten Schäden an den Zellkomponenten, sondern auch in der direkten Regulation spezifischer Signalketten bestehen. Ferner korrelieren die Stoffwechselrate und die Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies zwar im Allgemeinen miteinander, jedoch kann ihre Beziehung komplex sein. Superoxidradikale etwa aktivieren in den Mitochondrien die Gruppe so genannter Entkopplungsproteine. Diese Eiweißstoffe können für einen Stoffwechselzustand sorgen, bei dem der Sauerstoffverbrauch steigt, aber der Gesamtgehalt an reaktiven Sauerstoffspezies fällt. Umgekehrtes passiert, wenn in Hefezellen ein Gen für ein RAS-Protein aktiviert wird.

Trotz dieser Komplexität lassen sich viele der bisher bekannten Regulationsfaktoren, welche die Lebensspanne positiv oder negativ beeinflussen, in ein vergleichsweise einfaches Schema einordnen. Ein Beispiel: Wird die Mitochondrienfunktion gehemmt – was anscheinend in vielen Fällen bei den RNA-Interferenz-Studien an Fadenwurm-Genen geschah –, dann könnte der Organismus auf alternative Möglichkeiten der Energieproduktion umschalten. Diese Stoffwechselwege außerhalb der Mitochondrien sind zwar weniger effektiv, erzeugen jedoch auch weniger an reaktiven Sauerstoffspezies. Und das führte vielleicht zu der beobachteten längeren Lebensspanne.

Mutationen, die letztlich das Protein DAF-16 aktivieren, würden die Expression von Zielgenen fördern, die für die Produktion antioxidativ wirksamer Faktoren sorgen. Sie dürften auch den Stoffwechselstatus insgesamt im Köper verschieben. Eine eingeschränkte Kalorienzufuhr könnte schließlich viele Veränderungen herbeiführen, etwa einerseits die Aktivität der Insulin/IGF-1-Signalkette senken und andererseits die des Sir2-Proteins steigern. Die Folge des letzen Schritts wäre eine verminderte Genexpression und DNA-Rekombination. Unter dem Strich dürften dann weniger an reaktiven Sauerstoffspezies anfallen und zugleich freie Radikale besser abgefangen werden.

Wenn auch diese Theorie bislang die Flut experimenteller Daten am ehesten erklärt, bleiben doch störende Aspekte. Ein Beispiel: Wenn Altern so etwas wie

die Folge der »Schadstoffe« ist, die der »Verbrennungsmotor« der Mitochondrien ausstößt, dann sollten sich die Schäden durch Radikale zu einem gewissen Grad kumulieren. Hielt man jedoch Taufliegen auch nur zwei Tage bei Schmalkost, dann glich sich ihre Sterblichkeitsrate der von Fliegen an, die ihr ganzes Leben hungerten.

Länger gut leben?

Ein weiteres Beispiel: Zumindest bei Hefezellen verlängert ein reduziertes Zuckerangebot zwar die Lebensspanne, verdreifacht jedoch den Sauerstoffbedarf, weil die Zellen dann Glucose bevorzugt »verbrennnen« statt vergären, was keinen Sauerstoff erfordert. Zwischen dessen Verbrauch und der Entstehung reaktiver Sauerstoffspezies besteht zwar keine strenge Korrelation. Doch würde man erwarten, dass seine Verdreifachung die Konzentration freier Radikale eher erhöht als erniedrigt. Die Theorie der freien Radikale bietet also einen nützlichen, jedoch nicht widerspruchsfreien Orientierungsrahmen zum Verständnis auch unserer Alterungsprozesse. Unklar ist vor allem noch, ob erhöhte Konzentrationen an Sauerstoffradikalen die Alterung hervorrufen oder lediglich mit ihr korrelieren.

Die bisher entdeckten Gene, die bei einfach gebauten Organismen etwas mit der Regulation der Lebensspanne zu tun haben, gehören offenbar vorwiegend zu ein paar definierten Kategorien und Signalketten. Da Letztere wie auch die alterungsassoziierten Gene evolutionär konserviert sind, besteht Hoffnung, eines Tages auch beim Menschen Alterungsprozesse aufhalten und das Leben verlängern zu können – wenn dies denn wünschenswert ist. Die gesellschaftlichen Folgen solcher Eingriffe liegen auf der Hand, vor allem für die ohnehin überalterten Gesellschaften der westlichen Industrienationen.

Da eine eingeschränkte Kalorienzufuhr bei vielen Organismen zur Lebensverlängerung führt, arbeiten nicht wenige Wissenschaftler begeistert an Pharmaka, die entsprechende Effekte hervorrufen sollen. Bereits letztes Jahr wurden eine Reihe niedermolekularer, strukturell verwandter Wirkstoffe entwickelt, welche die Aktivität des Sir2-Proteins in Hefezellen steigern und so die Effekte der Kalorienrestriktion auf die Lebensdauer nachahmen. Die Hefezellen erreichten damit selbst in einem nährstoffreichen Milieu ein höheres Alter. Für alle, die den kulinarischen Genüssen dieser Welt nicht entsagen wollen, gibt dies Anlass zu gewissem Optimismus.

Weitere viel versprechende Ansätze könnten etwa sein, die Insulin/IGF-1-Signalkette teilweise zu hemmen, das Eiweiß $p66^{shc}$ zu blockieren oder Forkhead-Proteine moderat zu aktivieren. Selbst wenn diese Strategien beim Menschen tatsächlich das Leben verlängern würden – werden wir Mittel finden, zugleich die Lebensqualität zu wahren? Nach Auffassung einiger Wissenschaftler ist die Menagerie langlebiger Würmer, Taufliegen und Mäuse eigentlich schon erkennbar Beweis genug, dass solche Therapien zumindest funktionieren werden. Um sich jedoch klar zu machen, wie viele Rätsel es auf diesem Gebiet noch gibt, genügt ein Besuch auf einem kleinen Friedhof in Arles. Dort steht ein Grabstein mit der schlichten Inschrift: Jeanne Calment, geboren 1875, gestorben 1997. ◁

© Nature Publishing Group

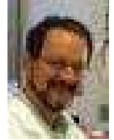
Aktuelle Theorie der freien Radikale

Nach einer Theorie könnte Altern auf Schäden durch so genannte freie Radikale beruhen, reaktionsfreudige Sauerstoffverbindungen mit ungepaartem Elektron. Bei hohem Nährstoff- und Sauerstoffangebot steigt in den Zellkraftwerken, den Mitochondrien, die Stoffwechselrate. Dabei entstehen vermehrt solche reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) als Abfallprodukt. Ihre Konzentration dürfte die Alterungsgeschwindigkeit über zwei Mechanismen erhöhen: einerseits durch zufallsverteilte Oxidationsschäden an DNA und Proteinen, andererseits über spezielle Signalketten, die vom Reduktions-/Oxidationsstatus bestimmter Proteine abhängen. Andere Eiweißstoffe, darunter die Werner-DNA-Helicase sowie das Protein Sir2 und seine Verwandten, könnten die Lebensspanne durch Reparatur von DNA-Schäden oder Unterdrücken von Rekombinationen zwischen Chromosomen verlängern.

Zwar korreliert der Sauerstoffverbrauch mit den ROS-Konzentrationen, der Zusammenhang ist jedoch komplexer Natur. Eiweißstoffe wie Ras oder Proteine, deren Wirkung in einer Entkopplung der mitochondrialen Atmungskette besteht, verändern möglicherweise die Menge an Radikalen pro Molekül verbrauchten Sauerstoffs – durch geringeren Ausstoß oder besseres Abfangen dieser schädlichen Produkte. Eine Zelle erzeugt auch weniger an freien Radikalen, wenn sie auf nichtmitochondriale Wege ausweicht, die aber ineffizient sind. Wie sie Stoffe zwischen diesen und den mitochondrialen Stoffwechselwegen aufteilt, ist ebenfalls noch unklar.

S. NEMOTO UND T. FINKEL, NATURE 429, 13.5.2004, S. 152

Autoren und Literaturhinweise

Shino Nemoto und **Toren Finkel** arbeiten in der Abteilung für Herz-Kreislauf-Forschung des National Heart, Lung and Blood Institute an den US-amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland). Finkel leitet den molekularbiologischen Zweig. Ihr Artikel erschien erstmals unter dem Titel »Ageing and the Mystery of Arles« in Nature, Bd. 429, S.149, 2004. Er enthält die vollständige Liste der Fachliteratur.

Zensur in der Zelle. Von Nelson C. Lau und David P. Bartel, in: SdW 10/2004 S. 52

Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille. Von Mark A. Lane et al., in: SdW 7/2003, S. 58

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Nanosensoren ohne Magnete

Es wird noch nicht die nächste Generation von Festplatten sein, die eine neue Speichertechnik erfordert. Doch der »Außergewöhnliche Magnetowiderstand« steht bereits mit Nanosensoren in den Startlöchern, die Leistungsdaten weiter zu steigern.

Von Stuart A. Solin

Mitunter bringt die Erforschung eines Phänomens ein ganz anderes zum Vorschein, das sich als aufregender erweist. Dieses Glück widerfuhr 1995 meiner Arbeitsgruppe am NEC-Forschungsinstitut in Princeton (New Jersey). Wir untersuchten damals die elektronischen Eigenschaften einer komplexen Halbleiterstruktur aus hauchdünnen Lagen von Gallium-Arsenid und Gallium-Aluminium.

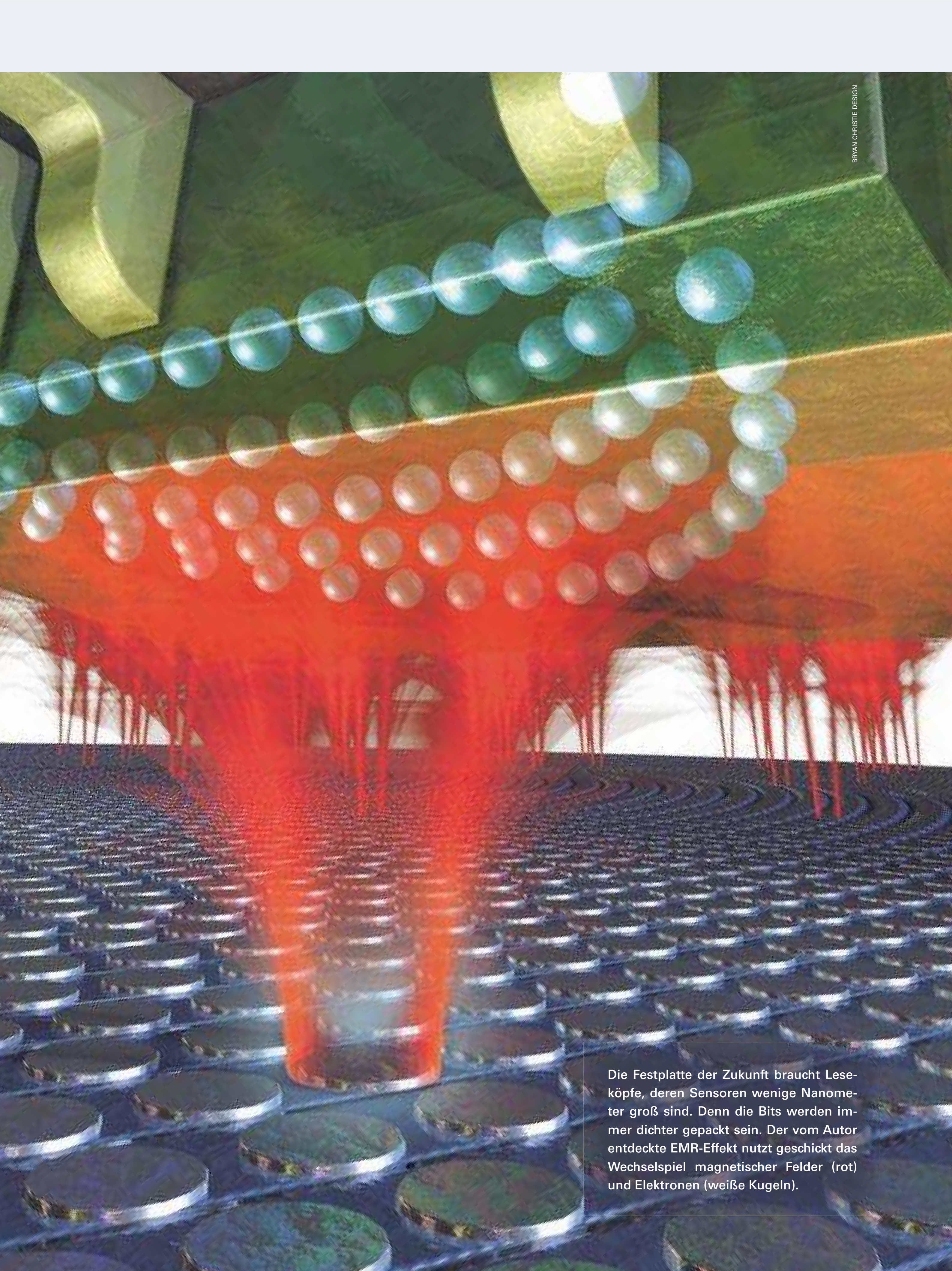
Alle Bestandteile waren nichtmagnetisch. So schien es eine gute Idee, den Fluss der Ladungsträger über dessen Wechselwirkung mit einem äußeren Magnetfeld zu analysieren. Doch zu unserer großen Überraschung reduzierte ein starkes Feld den Strom drastisch. Anders ausgedrückt: Wir hatten unbeabsichtigt den elektrischen Widerstand nach oben schnellen lassen. Der Effekt war so ausgeprägt, dass wir uns von nun an darauf konzentrierten, seine Physik zu verstehen.

Bis 1997 hatten wir die Grundlagen erkannt. Außerdem konnten wir vorhersagen und ein Jahr später verifizieren, dass diese als Magnetowiderstand (MR) bezeichnete Widerstandsänderung bei einer noch einfacheren Struktur aus Gold (Au) und einer einzelnen Lage des Halbleiters Indium-Antimonid (InSb) noch größer ausfiele. Bei Raumtemperatur und einem Feld von fünf Tesla maßen wir tatsächlich eine Erhöhung um eine Million Prozent, das Vieltausendfache jedes anderen Magnetowiderstands bei dieser Temperatur. Wir nannten den Effekt deshalb »außergewöhnlich« *(extraordinary magnetoresistance)*. Weil EMR-Sensoren weitaus empfindlicher auf Magnetfelder reagieren müssten, erwarten wir eine Vielzahl kommerzieller Anwendungen insbesondere in der Datenspeicherung.

Das ist nicht ins Blaue hinein gedacht, denn derartige Techniken sind dort bereits im Einsatz. Als Peter Grüneberg vom Forschungszentrum Jülich und Albert Fert von der Universität Paris-Süd 1988 den Riesenmagnetowiderstand (*giant magnetoresistance*, GMR) entdeckten, legten sie die Basis für die Festplatten von heute.

Tanz der Elektronen

MR-Effekte treten auf, wenn das magnetische Feld der Atome im Material mit den hindurchfließenden Elektronen wechselwirkt. Im Allgemeinen geschieht das über die Eigenrotation, den Spin dieser Ladungsträger. Vereinfacht gesagt macht er sie zu winzigen Stabmagneten, doch normalerweise ist die individuelle Ausrichtung rein zufällig und daher ohne Wirkung auf den Stromfluss. In einem magnetischen Material tendieren die Elektronen jedoch dazu, sich an dessen inneren Feld zu orientieren. Einmal »po- ▷

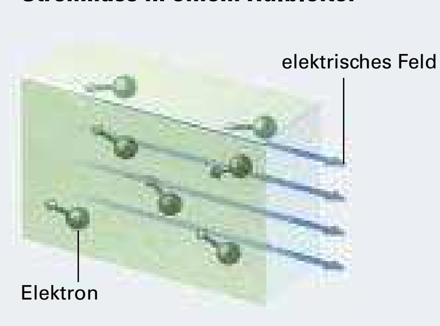


Die Festplatte der Zukunft braucht Leseköpfe, deren Sensoren wenige Nanometer groß sind. Denn die Bits werden immer dichter gepackt sein. Der vom Autor entdeckte EMR-Effekt nutzt geschickt das Wechselspiel magnetischer Felder (rot) und Elektronen (weiße Kugeln).

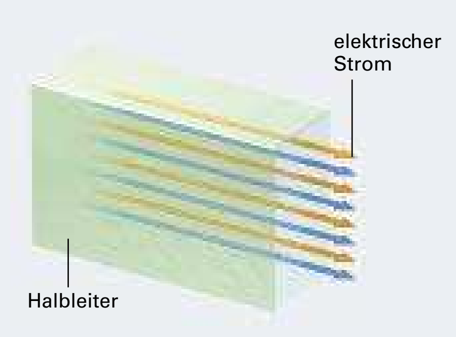
Die Erzeugung des Außergewöhnlichen

Magnetowiderstand entsteht, wenn ein magnetisches Feld die Konfiguration elektrischer Felder und damit den Stromfluss ändert. Außergewöhnlich wird er, wenn die Geometrie einer Metallhalbleiterstruktur den Effekt verstärkt.

Stromfluss in einem Halbleiter

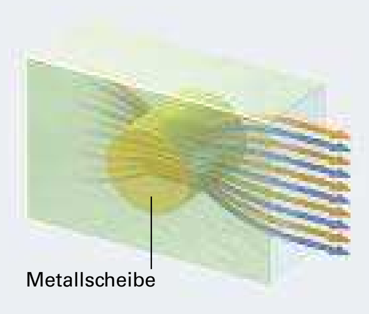


Wird eine Spannung an die Enden einer Halbleiterplatte (grün) angelegt, entsteht ein elektrisches Feld (blaue Pfeile). Elektronen beginnen daraufhin durch das Material zu driften.

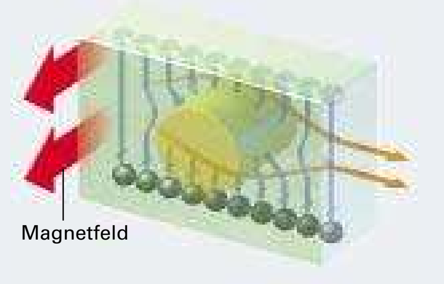


Diese Bewegungen summieren sich zu einem elektrischen Strom (orange Pfeile), der parallel zu den elektrischen Feldlinien fließt. (Elektronen sind negativ geladen, deshalb weist die Stromrichtung gegen die Richtung der Elektronendrift.)

Außergewöhnlicher Magnetowiderstand

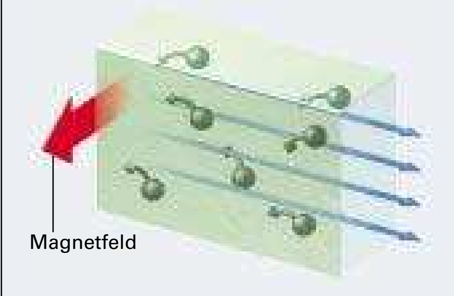


Elektrische Felder stehen immer senkrecht auf einer Metalloberfläche. Eine Scheibe aus Gold im Halbleiter stört deshalb die Feldlinien und bündelt den Stromfluss. Nun können mehr Ladungsträger durch die Struktur transportiert werden, ihr elektrischer Widerstand ist also sehr gering.

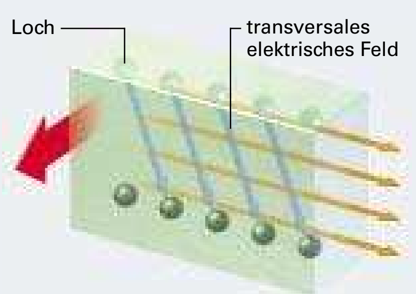


Ein starkes Magnetfeld hat die in der rechten Spalte unten geschilderte Wirkung: Ein transversales elektrisches Feld entsteht und schließlich fließt der Strom senkrecht zum Ausgangsfeld. Damit umfließt er die Goldscheibe und ist auf die schmalen Halbleiterstreifen beschränkt. Der Fluss schwindet und der Widerstand wächst immens.

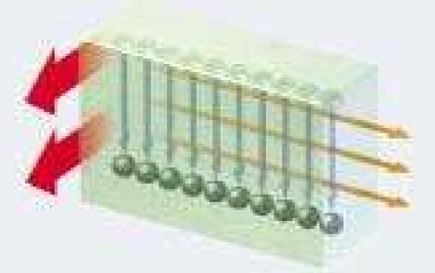
Magnetischer Seitenwind



Ein magnetisches Feld (roter Pfeil) senkrecht zur Platte krümmt die Elektronenbahnen. Das verlängert deren Weglänge und verringert somit die durchschnittliche Driftgeschwindigkeit. Der Stromfluss nimmt ab, was einem Magnetowiderstand entspricht.



Die gekrümmten Wege bewirkten zudem, dass sich Elektronen an der Unterseite und Löcher (positiv geladene Elektronenfehlstellen) an der Oberseite der Platte sammeln. Das wiederum erzeugt ein transversales elektrisches Feld und die Ebene des Stromflusses kippt.



Ist das magnetische Feld stark genug, fließt der Strom sogar senkrecht zu den elektrischen Feldlinien.

ALLE GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ larisiert«, passieren sie dann leichter solche Strukturen, deren Magnetfelder parallel zur Polarisationsebene stehen, während eine antiparallele Ausrichtung bremst. Deshalb haben solche Systeme zwei Lagen magnetischen Materials: Die erste polarisiert den Strom, die zweite steuert ihn. Auch die Leseköpfe der GMR-Festplatten sind so aufgebaut. Es gibt aber noch eine zweite Art und Weise, wie Magnetfelder mit Elektronen wechselwirken können, und das ist die Basis des EMR: Auch die Bewegung von Ladungsträgern erzeugt ein Magnetfeld. Auf diesem Prinzip beruht zum Beispiel jeder Elektromagnet – bei Stromfluss entsteht ein Feld. Aus diesem Grund erfahren Elektronen beim Durchqueren eines äußeren Felds eine Kraft, die ihre Bahnen krümmt (siehe Kasten oben). Ein ausreichend starkes Feld verbiegt sie so massiv, dass die Ladungsträger länger benötigen, um von einem Ende des Leiters beziehungsweise des elektronischen

Bauteils zum anderen zu gelangen. Kurz: Der elektrische Widerstand wächst. Tatsächlich reisen die Elektronen entlang zufälliger Zickzacklinien, weil sie mit Gitteratomen und Defekten des Materials kollidieren. Das Magnetfeld krümmt jeden dieser Abschnitte und vergrößert damit insgesamt die Weglänge jedes Elektrons. Dieser Effekt ist allerdings noch wenig ausgeprägt.

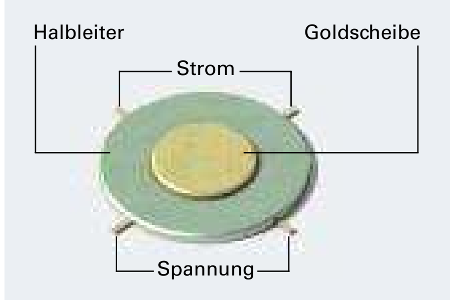
Beim EMR kommt hinzu, dass die gekrümmten Bahnen obendrein von der speziellen Geometrie des Materials auf Skalen von Nanometern (Millionstel eines Millimeters) beeinflusst werden. Sowohl Form und Ort als auch die elektrischen Eigenschaften der Bestandteile des Bauteils – wie etwa elektrische Kontakte und Regionen unterschiedlicher Materialien – können zu diesem »geometrischen« MR beitragen.

Ultradünne Halbleiterfilme und eine Scheibe aus Gold

Dreh- und Angelpunkt ist die feine Goldscheibe, die in einen quaderförmigen Halbleiter eingebettet wird. Wenn wir eine Spannung an die elektrischen Kontakte anlegen, fließt Strom entlang der elektrischen Feldlinien. Weil diese immer senkrecht zu leitenden Oberflächen stehen, konzentrieren sie sich auf der Metallscheibe. Der Strom wird regelrecht »getrichtert«, was den elektrischen Widerstand des Bauteils als Ganzes sehr stark reduziert. Der exakte Wert hängt von der Geometrie ab, hier also von Größenverhältnissen und Formen der Komponenten. Ein äußeres Magnetfeld kann den Strom zwingen, die Scheibe zu umfließen, als sei das Gold durch eine Aushöhlung ersetzt worden. Der verbleibende Halbleiter hat aber sehr viel höheren elektrischen Widerstand – dem Fluss der Ladungsträger steht nur wenig Raum zur Verfügung.

Wir profitierten bei unseren Untersuchungen von den Pionierarbeiten durch Charles Wolf und Lester Stillman an der Universität Illinois; sie hatten in den 1970er Jahren hybride Strukturen aus Halbleitern und Metallen erforscht. Insbesondere vermaßen sie die Beweglichkeit von Ladungsträgern. Sie ist ein Maß für die Leichtigkeit, mit der Elektronen und Löcher in einem elektrischen Feld fließen (ein Loch ist sozusagen ein fehlendes Elektron und verhält sich in vielerlei Hinsicht wie ein positiv geladenes Teilchen).

Vom Labor in die Praxis

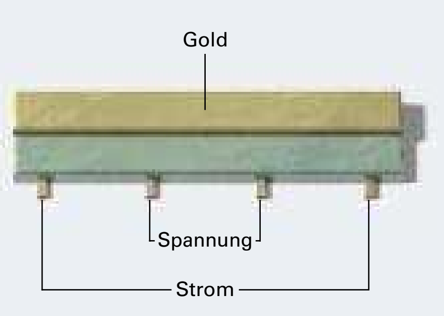


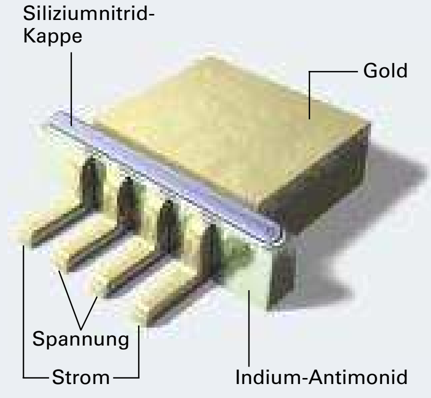


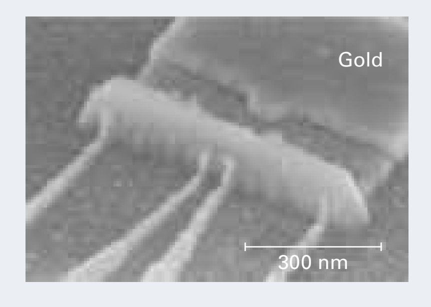


Wie aus einer Scheibe ein Streifen wird

Die kreisförmige Anordnung eines EMR-Widerstandsbauteils ist für die kommerzielle Herstellung nanoskopischer Elektronik nicht sehr praktisch. Doch eine »konforme Abbildung« erzeugt ein lineares und damit einfacher zu fertigendes Design mit den gleichen Eigenschaften. Im Prinzip wird die Scheibe entlang des Radius aufgeschnitten und abgerollt.







Damit wurde der Prototyp eines Festplattenlesekopfs konstruiert (links). Die Siliziumnitrid-Kappe (blau) isoliert die elektrischen Kontakte vom Gold. Die mögliche Datendichte einer Speichermediums, die mit diesem Lesekopf möglich ist, wird durch die Dicke des Indium-Antimonid-Transistors (grün) und den Abstand der beiden Spannungskontakte bestimmt. Dieser Prototypkopf könnte immerhin schon Datendichten bis 700 Gigabit pro Quadratzoll bearbeiten, dreimal so viel wie die geschätzte Dichte der nächsten Generation von TMR-Köpfen.

Die regelmäßigen Rillen an den Seitenwänden der InSb-Struktur (links) waren zunächst unbeabsichtigt, stellten sich aber als entscheidend für die Funktion des Bauteils heraus.

ALLE GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE DESIGN; FOTO: STUART A. SOLIN

Aufbauend auf diesen Arbeiten stellten wir fest, dass der EMR in schwachen Magnetfeldern quadratisch mit der Ladungsträgerbeweglichkeit wächst. Die wiederum hängt von der so genannten Bandlücke ab, der Energie, die man Elektronen zuführen muss, damit sie im Halbleiter vom gebundenen in den freien Zustand wechseln können. Indium-Antimonid erwies sich als ein guter Kandidat. Lesley Cohen und der inzwischen verstorbene Tony Stradling vom Imperial College in London widmeten sich der Entwicklung ultradünner Filme aus diesem Halbleiter. Michael Santos von der Universität von Oklahoma erreichte hohe La- ▷

Die Konkurrenten



Künstlerische Umsetzung der im Folgenden genannten Effekte, mit dem MR beginnend

Ändert sich der elektrische Widerstand eines Materials unter dem Einfluss eines Magnetfelds, bezeichnet man die Zu- oder Abnahme als **Magnetowiderstand (*magnetoresistance*, MR).** Dieser Effekt, der vom britischen Physiker William Thomson (Lord Kelvin) 1857 entdeckt wurde, ist bei Metallen vernachlässigbar und in Halbleitern sehr klein. In den letzten Jahrzehnten wurden aber Varianten entdeckt, darunter einige mit milliardenschweren kommerziellen Anwendungen.

Der Riesenmagnetowiderstand (GMR, *giant MR*)
Gegen ihn muss sich jede neue Technik behaupten. Zwei ferromagnetische Lagen schließen eine Schicht nichtmagnetischen Metalls ein, das die Magnetisierung einer der beiden Ferromagnetika fixiert, während ein externes Magnetfeld die Orientierung der anderen neu ausrichten kann. Elektrischer Strom fließt dann maximal, wenn die Magnetfelder beider Schichten parallel zueinander ausgerichtet sind, minimal bei antiparalleler Orientierung. Leseköpfe moderner Festplatten nutzen dies, um magnetisch gespeicherte Informationsbits auszulesen.

Der Tunnelmagnetowiderstand (TMR, *tunneling MR*)
Ein sehr dünner Isolator ersetzt die Metallschicht der GMR-Struktur. Strom fließt hier nur auf Grund des Tunneleffekts – eine gute Technik für die nächste Generation von Leseköpfen.

Der Kolossale Magnetowiderstand (CMR, *colossal MR*)
Entdeckt in Kristallen aus Manganoxiden, so genannten Manganiten. Ein Magnetfeld ändert die Eigenschaften von nichtmagnetisch und isolierend zu ferromagnetisch und metallisch, verringert also den elektrischen Widerstand. Der Übergang funktioniert im Allgemeinen nur bei Temperaturen unterhalb von 150 Grad Kelvin und bei Magnetfeldern von einigen Tesla. Für Leseköpfe kommt dieser Effekt wohl nicht in Frage.

Der Ballistische Magnetowiderstand (BMR, *ballistic MR*)
Bringt man magnetische und metallische Leiter auf wenige Nanometer Abstand zusammen, ändert sich unter einem Magnetfeld ihr Magnetismus und der elektrische Widerstand der Struktur wächst. Der Effekt basiert auf der ballistischen, das heißt geradlinigen Bewegung der Elektronen durch den Nanokontakt. Der Effekt wurde 1999 am Consejo Superior de Investigaciones Cientificas in Madrid entdeckt, ist aber nicht unumstritten. Die Nutzung des BMR für Leseköpfe wäre eine Möglichkeit.

Welche Leistungen diese Typen und der EMR in den nächsten fünf Jahren in der Festplattentechnik erreichen sollen und welche Werte sie jeweils schon heute erreichen, listet die unten stehende Tabelle auf.

Typ	MR bei Raumtemperatur in Prozent	Datendichte in Gb/in^2	Signal-Rausch-Verhältnis in Dezibel (größer ist besser)	Reaktionszeit in Nanosekunden (kleiner ist besser)	erforderliches Magnetfeld in Tesla (kleiner ist besser)
Zielvorgabe	4 – 10	100 – 1000	30 – 40	0,01 – 0,1	0,005 – 0,05
EMR	>35	>300	43	<0,001	0,05
GMR	10	125	29	0,1	0,005
TMR	15	200 (geschätzt)	34	0,1	0,001
CMR	0,4	100 (geschätzt)	–17	1,0	0,05
BMR	3000	>1000	10	0,1	0,03

dungsträgerbeweglichkeit durch Heterostrukturen aus InSb und Indium-Aluminium-Antimonid. Dirk Grundler und seine Kollegen von der Universität Hamburg untersuchten den EMR zudem in hybriden Strukturen aus Indium-Arsenid und Metallen.

Hoch empfindliche Magnetfeldsensoren könnten helfen, industrielle Prozesse genauer zu kontrollieren, etwa durch eine Positionsbestimmung der Werkzeuge von Fertigungsrobotern oder durch die Überwachung von Maschinen anhand ihrer Magnetfelder. Ein weites Feld eröffnet der Automobilbereich, von intelligenten Stoßdämpfern über eine präzise Steuerung der Motoren bis zu Systemen der Verkehrszählung. Im Konsumentenmarkt werden solche Sensoren im Mobilfunk ebenso eingesetzt werden wie in Sortiergeräten der Banken. Präzise

Messgeräte für schwache wie auch für starke Magnetfelder benötigt schließlich auch die moderne Medizintechnik.

Von all diesen Anwendungen stellen Leseköpfe für Festplatten sicherlich die größten technischen Herausforderungen dar. Ein Informationsbit besteht aus einer winzigen magnetisierten Zone der Platte beziehungsweise aus dem davon erzeugten Feld. Vereinfacht gesagt: Weist das lokale Magnetfeld von der Platte weg, repräsentiert es eine »Eins«, zeigt es in die Platte, eine »Null«. Jeder Quadratzentimeter einer heutigen Festplatte umfasst rund drei Milliarden Bits (in der üblichen Schreibweise: 20 Gigabit/Quadratzoll). Soll die Kapazität weiter wachsen, müssen deren Abmessungen noch mehr schrumpfen und damit auch die des Lesekopfs. Mehr noch: Weil das Magnetfeld eines kleineren Bereichs der Platte schwächer sein wird, aber andererseits schneller unter dem Sensor wegrast, muss dieser empfindlicher messen und rascher reagieren.

Ob ein neues Verfahren für diese Anwendung geeignet ist, hängt auch vom zu erwartenden Signal-Rausch-Verhältnis ab: In der Messung überlagern Störungen das Nutzsignal, deren Anteil sollte möglichst gering sein. Ein Problem bei den bislang üblichen Sensoren etwa mit GMR ist das magnetische Rauschen. Es entsteht, weil die Vielzahl der Atome im magnetisierten Material zwar eine einheitliche Ausrichtung hat, jedes Atom aber statistischen Schwankungen unterliegt. Bei großen Volumina heben sich solche Fluktuationen im Mittel auf und sind vernachlässigbar. Wenn Bit jedoch schrumpft, wächst der Anteil dieses Rauschens. Der Effekt begrenzt die mögliche Datendichte für Leseköpfe aus magnetischen Materialien auf einige Hundert Gigabit pro Quadratzoll (Gb/in^2). In den nächsten fünf Jahren sollen aber bis Tausend Gb/in^2 beziehungsweise ein Terabit pro Quadratzoll (Tb/in^2) erreicht werden. Der EMR löst das Problem, da keine magnetischen Materialien verwendet werden.

Die geforderte Dichte bedeutet, dass jedes Bit einen Fleck mit einer Kantenlänge von 25 Nanometern belegt. Das aktive Leseelement muss vergleichbar groß sein. Doch in nanoskopischen Dimensionen ändert sich die Physik der elektrischen Leitungsprozesse derart, dass der EMR deutlich kleiner ausfällt – eine Herausforderung an die Wissenschaft. Auch technisch ist eine solche Nanostruktur anspruchsvoll, denn um wirtschaftlich zu sein, muss die Fertigung mit konventionellen Verfahren arbeiten.

Unter diesen Randbedingungen mussten wir erkennen, dass die beschriebenen Scheibenstrukturen nicht in Frage kamen. Deshalb wurde das Team von NEC Princeton durch die Physiker J. Shen Tsai und Yu A. Pashkin von NEC Japan erweitert. Beide sind Experten für die elektrische Leitung in Nanostrukturen beziehungsweise für die Elektronenstrahl-Lithografie. Und diesem Team gelang die Lösung durch eine Art mathematischen Trick. Mit dem Verfahren der »Konformen Abbildung« wurde die kreisförmige Geometrie in eine lineare überführt, ohne dass sich die Eigenschaften geändert hätten (was wir natürlich experimentell bestätigt haben). Nun bilden der Halbleiter und das Metall zwei aneinander liegende Streifen und alle elektrischen Kontakte führen auf der freien Seite des Halbleiters heraus. Diese lineare Version lässt sich leicht auf nanoskopische Dimensionen skalieren.

Nützliche Defekte

Um das Bauteil herzustellen, benutzten wir modernste Elektronenstrahl-Lithografie – und Flugzeuge: Unsere Werkstücke reisten während ihrer Herstellung viermal zwischen Princeton und Tsukuba hin und her. Doch das Ergebnis war die vielen zurückgelegten Kilometer wert: 700 Gb/in^2. Eingebaut in einen Lesekopf mit allen daraus erwachsenden Restriktionen sollte etwa die Hälfte davon übrig bleiben.

Nur eines machte uns Sorgen: Mit einem Magnetfeld von 0,05 Tesla erreichten wir einen EMR-Effekt von 35 Prozent, doch unsere theoretischen Arbeiten ergaben, dass es eigentlich weniger als ein Prozent sein sollten. Denn in der Nanodimension ändert sich die Bewegung von Ladungsträgern. Normalerweise driften Elektronen und Löcher auf zufälligen Zickzackbahnen in die Richtung des fließenden Stroms. Dabei stoßen sie immer wieder mit Gitterfehlstellen zusammen. Die mittlere gerade Wegstrecke dazwischen – die »mittlere freie Weglänge« – ist nun größer als einige Strukturen unseres Sensors. Infolgedessen trifft ein Ladungsträger nun eher eine Seitenwand als einen Defekt. Das macht seine Bewegung »ballistisch« – er durchquert die Struktur auf einer Geraden statt im Zickzack. Doch das, so zeigten die Berechnungen, verringert den Einfluss eines Magnetfelds und sollte den EMR signifikant verschlechtern.

Warum also stimmten Theorie und Praxis nicht überein? Es zeigte sich, dass wir abermals von einem Glücksfall profitiert hatten. Denn der Herstellungsprozess erzeugte annähernd periodisch geriffelte Seitenwände, was die Streuung der auftreffenden Ladungsträger verstärkt. So wurde aus der ballistischen Bewegung wieder eine Diffusion. Mittlerweile können wir diese Gestaltung der Oberflächen gezielt vorgeben.

EMR-Leseköpfe hätten zusätzlich zu der hohen Datendichte und dem geringen magnetischen Rauschen noch eine Reihe weiterer nützlicher Eigenschaften. Zum Beispiel reagieren sie mehr als hundert Mal schneller auf Feldänderungen als andere. Auch ließen sie sich leicht in Halbleitersubstrate integrieren, was die Produktionskosten senkt. Allerdings gibt es auch einen Nachteil: Viel mehr als Zimmertemperatur ist nicht gestattet.

Noch sind EMR-Sensoren eine neue und unerprobte Technik, und die Konkurrenz schläft nicht. Vielleicht wird die »hitzegestützte magnetische Aufzeichnung« (HAMR, *heat-assisted magnetic recording*) des Festplattenherstellers Seagate oder die auf der Rastersondentechnik basierenden Nanolaufwerke »Millipede« von IBM das Rennen machen (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 90). Nun, dann wird der außergewöhnliche Magnetowiderstand sein Potenzial eben in der Automobil- oder Medizintechnik ausspielen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Stuart A. Solin lehrt seit 2002 Experimentalphysik am College of Arts & Sciences an der Washington-Universität in St. Louis (Missouri). Zuvor arbeitete er am NEC-Forschungsinstitut in Princeton (New Jersey), wo er mit verschiedenen Preisen geehrt wurde.

Semiconductor fridges get into shape. Von Stuart A. Solin, in: Physics World, Bd. 14, Nr. 6, S. 29, 2001

Layered magnetic structures: history highlights, applications. Von Peter Grünberg, in: Physics Today, Bd. 54, Nr. 5, S. 31, Mai 2001

Special issues on magnetoelectronics, in: Physics Today, Bd. 48, Nr. 4, April 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

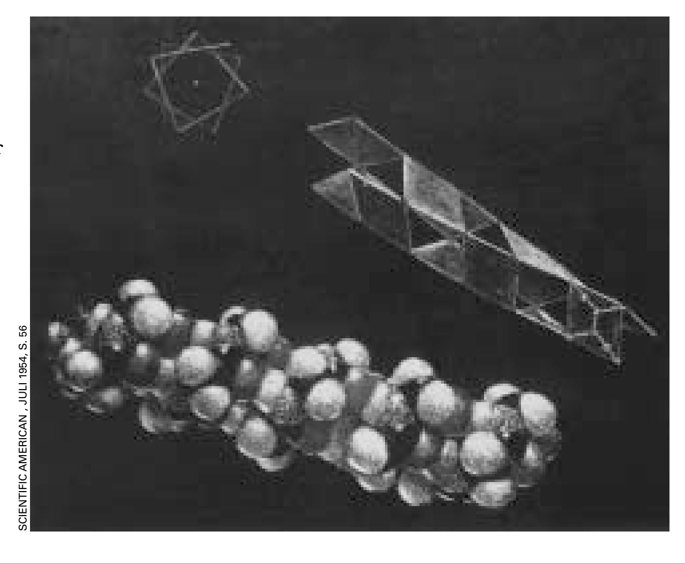


Anti-Proton nachgewiesen

»Auf die Existenz eines ›Anti-Protons‹ ist bereits vor zwei Jahrzehnten … geschlossen worden … Bruno Rossi vom M.I.T. (USA) konnte kürzlich im Observatorium für Kosmische Strahlen in Colorado auf einer ausgelegten photographischen Platte die Wirkungen eines bisher unbekannten Elementarteilchens identifizieren, das nach seiner Ansicht ein ›Anti-Proton‹ gewesen ist, also ein Teilchen mit der gleichen Masse wie das Proton, aber mit einer negativen an Stelle der positiven Ladung.« *(Orion, 9. Jg., Nr. 21/22, S. 918f., November 1954)*

Proteinstruktur enträtselt

»Der Nobelpreis für Chemie wird in diesem Jahre Linus Pauling, Professor für Chemie am kalifornischen Institut für Technologie, für seine Arbeiten über den Aufbau der Proteine verliehen. Professor Pauling gelang es, die verbindenden Kräfte in den Protein-Molekülen aufzufinden, er konstruierte Modelle einiger wichtiger Eiweißmoleküle, und man ist heute allgemein überzeugt, daß damit ein wichtiges Prinzip der molekularen Proteinstruktur entdeckt worden ist.« *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, 79. Jg., Nr. 48, S. 1811, November 1954)*



SCIENTIFIC AMERICAN, JULI 1954, S. 56

Trio gegen Kinderlähmung

»Der diesjährige Nobelpreis für Medizin wird … an die nordamerikanischen Poliomyelitis-Forscher John F. Enders, Thomas H. Weller und Frederick C. Robbins verliehen. Durch die Arbeiten der drei Wissenschaftler ist es möglich geworden, den Poliomyelitiserreger auf Gewebekulturen zu züchten, ein Fortschritt, der die Entwicklung einer wirksamen aktiven Schutzimpfung in greifbare Nähe rückt und zahlreiche wertvolle Erkenntnisse über die Pathogenese der spinalen Kinderlähmung ermöglicht hat.« *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, 79. Jg., Nr. 46, S. 1738, November 1954)*

◀ Auf Linus Pauling geht das Modell der Alpha-Helix zurück, einer spiralförmigen Struktur in Proteinen.

Tunnel ausgestellt

»In der Ausstellung der Pennsylvania Railroad Co. in der Weltausstellung in St. Louis befindet sich ein Stück des Tunnels, das … in den Schlamm des Hudsonflusses eingefügt werden soll. Der Abschnitt besteht aus acht kompletten Ringen …, die zusammen … 6,40 Meter lang sind. Im Mantel sieht man einen Teil des Gleises mit den Längsschwellen, Verbindungsstücken etc. … Im Innern des Tunnels befindet sich der Teil eines Wagens erster Klasse der Pennsylvaniabahn in voller Grösse.« *(Die Umschau, 8 Jg., Nr. 46, S. 914f., November 1904)*

▼ Das vormontierte Tunnelstück mit zwei Notfall-Fußsteigen ist fertig für die Einpflanzung in den Schlamm des Hudson Rivers.





»Rattin« gegen die Rattenplage

»Vor einem Jahre gelang es … Neumann … eine Bakterie zu entdecken und ein sehr haltbares … Präparat herzustellen, das Ratten in 6–12 Tagen tötet. Das Präparat ist für andre Tiere … sowie für Menschen ungefährlich … Dieses Mittel, Rattin genannt, wird … auf ein Stückchen Brot … gegossen und an Stellen hingelegt, wo Ratten sich besonders aufhalten … Ratten fressen es begierig und die Bakterie erzeugt bei ihnen eine tödliche Darmentzündung. Eine humanere Todesart als durch Krämpfe erzeugende Gifte und langwierigen Aufenthalt in Fangapparaten.« *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 45, S. 897, November 1904)*





E-Auto mit Traumwerten

»Bei der neuen (New Yorker) Elektromobiltype ist der neue Edison-Akkumulator verwendet worden … Wenn all die schönen Eigenschaften, die der neuen Type nachgerühmt werden, auch tatsächlich vorhanden wären, dann müßte die elektrische Energiequelle von schier unheimlicher Ergiebigkeit sein, denn nicht nur daß sie einen Wagen von 1500 kg mit sechs Personen Besatzung im Tempo von 32 km befördern kann, besorgt sie noch eine splendide Beleuchtung und eine … Erwärmung des Innenraums, und das alles ohne Nachladung über 100 km.« *(Allgemeine Automobil-Zeitung, 5. Jg., Nr. 45, Bd. 2, S. 29, Nov. 1904)*

Im Mikrokosmos des Kunstwerks

Am New Yorker Metropolitan Museum helfen Naturwissenschaftler dort, wo Restauratoren bei Schäden an Kunstwerken nicht mehr weiterwissen.

Von Hubertus Breuer

Auf einem offenen Regal stehen rotfigurige attische Vasen, als erwarteten sie jeden Augenblick einen Blumenstrauß. Neben einem mit Elfenbein dekorierten römischen Tisch findet sich ein demontierter etruskischer Streitwagen. Auf einem kleinen Holzpodest ergibt sich ein bronzener Gott, Dionysos, seinem Rausch. Wie eine unaufgeräumte Schatzkammer sehen die Kellerräume des »Metropolitan Museum of Art« dieser Tage aus. Der hehre Kunsttempel renoviert seine römischen und griechischen Galerien. Deshalb wird in der neonerhellten Abteilung für Objektkonservierung alles, was der Aufmerksamkeit bedarf, genauestens unter die Lupe genommen. Der Glanz der Antike lässt den Chemiker George Wheeler indes kalt.

»Man gewöhnt sich an alles.« Mit festem Schritt geht er in eine Ecke zu einem grauen Rollwagen. Obenauf liegt ein Plexiglaskasten, in dem ein Kalksteinrelief wie ein Patient auf zwei weißen Schaumstoffunterlagen ruht. Es entstammt einer Tempelanlage für Ramses I. aus Abydos, rund 1315 v. Chr., als Ägypten als unangefochtene Supermacht regierte. »Wir haben die schönsten Reliefs aus Abydos, die es außerhalb Ägyptens gibt«, erklärt Wheeler. Nur gehört diese Platte gewiss nicht dazu: Braune Sprenkel übersäen den Stein wie Masern, an den Kanten sind Stücke abgesplittert. Die Restauratoren wissen nicht weiter. Für solche Fälle verfügt das Metropolitan Museum über eine naturwissenschaftliche Abteilung, die den Mikrokosmos des kostbaren Guts erforscht. Wheeler gehört dazu.

Fast alle Museen unterhalten Restaurierungswerkstätten, in denen Fachleute dem kulturellen Erbe mit Pinseln, Bohrern und Spachteln zu Leibe rücken. Doch etliche Fragen, die sich Konservatoren, Kuratoren oder Kunsthistoriker stellen, lassen sich nur mit dem detektivischen Spürsinn des Naturwissenschaftlers und der Batterie seiner Analysegeräte beantworten. Deshalb verfügen bedeutende Kunststätten wie der Pariser Louvre oder das Getty-Museum in Los Angeles über ganze Mannschaften von Physikern, Chemikern und Biologen. Und auch am Schweizer Landesmuseum findet sich ein kleines »Zentrum für Konservierungsforschung«.

An all diesen Orten enthüllen Forscher mittels Röntgenstrahlung oder Infrarotlicht die Maltechniken alter Meister; sie ermitteln den chemischen Fingerabdruck von Keramiken, die Herkunft des verwendeten Tons oder kommen Patinierungstechniken von Renaissancebronzen auf die Spur. Nicht zuletzt prüfen sie Gegenstände auf ihre Echtheit. »Vieles, das uns zum Kauf angeboten wird, sieht optisch tadellos aus«, meint Robert Koestler, der als Biologe am Metropolitan Museum arbeitet. »Das täuscht oft. So haben wir dem Museum schon viel Geld gespart.«



Eine Kupferfigur aus der nordperuanischen Moche-Kultur

An der Authentizität des Abydos-Reliefs herrscht keinerlei Zweifel. Im Jahr 1911 kam es aus Ägypten als Geschenk des Bankiers Pierpont Morgan an das Museum; nur ein Jahr zuvor war es aus dem Wüstensand geborgen worden. Kalkstein ist von Haus aus brüchig – diese Platte aber besonders.

Damit nicht genug: Der Stein war durch die Überschwemmungen des Nils ▷

einem Wechselbad von Trockenheit und Nässe ausgesetzt. Das Relief saugte sich mit Salzen voll. Vor allem feuchtigkeitsbindendes Magnesiumsalz setzte sich im Stein fest. Es drohte zu kristallisieren, sobald es in eine trockenere Umgebung gelangte, und das Kunstwerk zu sprengen.



Rettungsaktion für ein Steinrelief

Deshalb versuchten Restauratoren bereits früh, mit etlichen Behandlungen den Stein zu retten – unter anderem mit Tungöl, Bienenwachs, Paraffin, Zellulosenitrat, Polyvinylacetat. Frustriert zählt Wheeler eine ganze Palette gut gemeinter, doch letztlich missglückter Behandlungen auf. Der Chemiker sucht jetzt nach Wegen, den Stein dauerhaft zu stabilisieren. Momentan sind zwei kleine Becken gesättigter Salzlösung unter dem Relief die einzige Hilfe. Sie halten die Luftfeuchtigkeit bei konstant 62 Prozent. »Eine Notlösung«, gesteht er zu.

Hoch über der unterirdischen Objektkonservierung, im dritten Stock des Museums, liegt die Abteilung für die Restaurierung von Zeichnungen und Fotografien. Sanftes Nachmittagslicht fällt durch die Fenster, auf großen Tischen liegt Seidenpapier, darauf warnen Schilder mit der Aufschrift »Vorsicht! Hier liegt Kunst!«. Die Restauratoren in diesen Räumen umweht ein feineres Flair als die handfesten Objektkonservatoren, die im Keller mit Holz, Metall, Leder und Stein arbeiten. Hier oben ist das Reich der argentinischen Chemikerin Silvia Centeno. In einer Dunkelkammer betreibt sie ein Raman-Spektroskop. Das Hightechgerät bestrahlt mit einem Laser mikroskopische Proben. Aus dem von Molekülen zurückgeworfenen Licht lassen sich dann chemische Struktur und Zusammensetzung erkennen. Meist analysiert Frau Centeno Gemälde, doch bisweilen finden auch mittelalterliche und archäologische Objekte den Weg in ihr Labor.

So arbeitete sie vor einiger Zeit an vergoldeten und versilberten Kupferobjekten der nordperuanischen Moche-Kultur. Diese Bevölkerungsgruppe hatte sich zwischen 200 v. und 600 n. Chr. in etwa demselben Gebiet niedergelassen wie später die Inkas; sie ist berühmt für ihre Goldschmiedekunst. In der Regel bearbeiteten die Künstler Folien aus einer Gold-Kupfer- oder Silber-Kupfer-Legierung zusätzlich mit Säure, die an der Oberfläche das minderwertigere Metall teilweise löste. Dadurch sah das Endprodukt fast wie pures Gold aus.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Ein Raman-Spektroskop zur chemischen Analyse von Kunstwerken. Hier wird »Ein Gang im Asyl« von van Gogh unter die Lupe genommen. Unten: Robert Koestler (hinten), der »Kammerjäger« des Metropolitan Museums, versiegelt ein kostbares Gemälde für den Transport.



KARIN L. WILLIS / METROPOLITAN MUSEUM OF ART

Wissenschaftler als Kammerjäger

Doch Centenos Objekte – unter anderem eine versilberte Scheibe mit einer goldenen Eule in der Mitte – entstammen nicht dem Zentrum der Moche-Kultur, sondern einem nördlichen Außenposten, der mit dem angrenzenden Gebiet der Vicús-Kultur in Berührung stand. Die Schmuckstücke von diesem Ort namens Loma Negra wurden offenbar nach einer anderen Methode hergestellt als die üblichen vergoldeten Werke der Moche. Zusammen mit dem Chemiker Mark Wypiski und der Restauratorin Deborah Schorsch ermittelte Centeno die Dicke der Edelmetallschichten, die Oberflächenstruktur und den Anteil anderer Metalle. Auf diese Weise erschloss das Team, dass diese Werke in Silber- und Goldlösungen eingetaucht worden waren. Somit entstammten sie nicht mehr der traditionellen Goldschmiedekunst der Moche, sondern waren in ihrer Herstellung stark von den Vicús beeinflusst. »Das überraschte uns«, erklärt Centeno, »denn stilistisch haben beide Kulturen wenig gemeinsam.«

Naturwissenschaftler zerbrechen sich nicht nur über die Kunstobjekte selbst den Kopf – auch der Einfluss der Umwelt fesselt ihre Neugier. Insbesondere haben sich Forscher innerhalb der letzten fünfzehn Jahre intensiv mit dem Trans-

port beschäftigt. Kein unwichtiges Thema, denn noch nie war so viel Kunst auf Reisen wie heute. Für die sichere Beförderung eines kostbaren Objekts werden klimatisierte Transportkisten gebraucht, die wiederum im luftgefederten und vollklimatisierten Laster auf die Straße gehen. Doch die Vorsichtsmaßnahmen helfen nicht immer. Mitunter bildet sich Kondenswasser unter Folien, oder Plastikhüllen laden sich so auf, dass sich etwa auf der Bildfläche die Farbe ablöst; Erschütterungen und Klimaschwankungen sind ohnehin nie ganz zu vermeiden.

Andreas Burmester, Direktor des Doerner-Instituts an der Pinakothek in München, hat über Jahre hinweg Software entwickelt, die ermöglicht, nach dem Transport eines Gemäldes mit Hilfe hochauflösender Kameras kleinste Veränderungen auf der Bildoberfläche zu vermessen. Sein Fazit: »Jede Reise verändert ein Werk. Risse werden größer, Farbspitzen splittern ab. Vor allem moderne Bilder, deren Maltechnik oft weniger solide ist, leiden darunter.«

Andere Forscher wie Rainer Drewello, Professor für Restaurierungswissenschaft an der Universität Bamberg, und seine Frau, die Diplombiologin Ursula Drewello, verfolgen hartnäckig die Schadstoffe und Mikroklimata in Museen. Wie kunstfeindlich die doch als Konservierungsmaschinen konzipierten Institutionen bisweilen sind, haben die beiden kürzlich im Germanischen Nationalmuseum in Nürnberg nachgewiesen.

Da ist zum einen das Mikroklima. Heizungen, Klimaanlagen, Besucher und Türen erzeugen ständig Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen. In diese Welt treibt es aus der umgebenden Innenstadt zudem anorganische Schadgase, beispielsweise Schwefeldioxid. Die treffen im Museum auf ein Schadstoffgemenge, das von Lacken, Bespannungen und Beschichtungen stammt. »Wir haben zum Beispiel beobachtet«, erklärt Drewello, »wie sich in einer Vitrine durch wenige Stunden täglicher Sonneneinstrahlung aus blauem Stoff Borsäure löste und auf allen Oberflächen niederschlug – kurz bevor dort mittelalterliche Metallgegenstände ausgestellt werden sollten.«

Die Probleme des Mikroklimas in Vitrinen sind Robert Koestler, seit zwanzig Jahren »Kammerjäger« am Metropolitan Museum, wohlvertraut. Unermüdlich stellt er Insekten, Mikroben und Pilzen nach, die das Kulturerbe der Menschheit als willkommenes Biotop besiedeln. Koestler gehört zu der Hand voll Biologen, die weltweit in Kunstmuseen angestellt sind. Er hat ein Verfahren entwickelt, Kunstwerke mit Argon – dem Edelgas, das in der Regel Glühbirnen füllt – zu begasen. Damit macht er Termiten, Holzwürmern oder Bakterien den Garaus. Pilze jedoch, die ebenfalls unter seine Zuständigkeit fallen, sind weitaus hartnäckiger.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die argentinische Chemikerin Silvia Centeno konserviert und restauriert Kunstwerke in der Abteilung für Zeichnungen und Fotografien am Metropolitan Museum in New York. Auf dem Arbeitstisch neben ihr liegt »Der Zuave« von Vincent van Gogh.

Wenn Pilze siegen

Bei einem Rundgang in den Räumen für Objektkonservierung greift Koestler mit weißen Handschuhen nach einer Elfenbeintafel aus Nimrud, Mesopotamien. Schwarze Punkte übersäen das edle Stück. Angesichts dieser Flecken wirkt Koestler einen Augenblick lang fast entmutigt. Er erklärt, dass die Punkte Melaninreste aus den Zellwänden einiger Pilze sind: »Bislang waren sie nur schwer zu beseitigen.« Doch derzeit sucht der Biologe mit Forschern an der Technischen Universität Wien ein Enzym so zu nutzen, dass es die Sprenkel beseitigt, ohne den Untergrund zu schädigen. Die ersten Tests erwiesen sich als viel versprechend.

Mitunter kommt es freilich vor, dass die Verunreinigungen auf einem Kunstwerk gar nicht von den Pilzen stammen, die es gegenwärtig aktiv bevölkern. Andere Pilze erfordern aber oft andere Reinigungsmittel. Um den Schadensweg zu rekonstruieren, hat Koestler zusammen mit einer ehemaligen Mitarbeiterin, Maria Pia Di Bonaventura, einen Test entwickelt, bei dem die Erbsubstanz DNA aus Pilzsporen analysiert wird. Oft ist das leichter gesagt als getan. »Da sind wir ratlos«, meint der Biologe bekümmert. Doch dann blinzelt er durch seine große Brille und meint: »Im schlimmsten Fall probieren wir es in einer unauffälligen Ecke mit Versuch und Irrtum.« ◁

Hubertus Breuer ist promovierter Philosoph und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in New York.



Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WERKZEUGE

Auf Messers Schneide

Das Universalwerkzeug war eine der ersten Erfindungen der Menschheit.

Von Alexander Glück

Als der Mensch lernte, von Feuersteinknollen scharfe Klingen abzuschlagen, um Fleisch zu zerteilen und diverse Materialien zu bearbeiten, legte er die Grundlage jeglicher technischen Entwicklung. Heute sind Messer in jeder Preislage und für jeden Zweck erhältlich.

Sieht man von dem Gebrauch als Waffe ab, gibt es wohl nirgends so viele Messervarianten wie in der Küche. Insbesondere professionelle Köche benötigen ein ganzes Sortiment, wenn sie Filet schneiden, eine Gans tranchieren oder Zwiebeln hacken. Auch auf der Tafel herrscht Vielfalt: Messer müssen Steaks zerschneiden, Butterbrote schmieren oder den Fisch von seinen Gräten trennen. Doch Klingen gibt es freilich auch in anderen Bereichen des Alltags: Im Nassrasierer wie im Rasenmäher eingesetzt, rücken sie langen Stoppeln zu Leibe. Nicht zu vergessen sind Messer in der Industrie, die Seiten eines Magazins von der Papierrolle trennen oder Stoffbahnen zurechtschneiden.

Klingen bestehen heute meist aus Stählen unterschiedlichen Kohlenstoffgehalts. Sie werden entweder aus einem Metallband ausgestanzt oder – dann meist maschinell – aus einem Rohling geschmiedet. Das entscheidet über Güte und Preis. Ganz besondere Sammlerstücke besitzen mehrere Lagen Stahl. Dies macht sie gleichzeitig hart und elastisch wie ihre legendären Vorläufer, die Damaszenerklingen. Werden insbesondere an die Klingenschärfe hohe Ansprüche gestellt, ist Kohlenstoffstahl geeigneter. Leider laufen solche Messer mit der Zeit an oder rosten sogar. Den blanken Edelstahl macht eine Zugabe von mindestens 10,5 Prozent Chrom und weiteren veredelnden Metallen korrosionsbeständig – an der Oberfläche bildet sich eine Chromoxidschicht, die aggressiven Sauerstoff abhält.

Daneben wurden in den letzten Jahren Klingen aus Industriekeramik immer beliebter. Sie sind ausgesprochen scharf und verschleißen deutlich weniger, stumpfen also langsamer ab. Der große Nachteil ist ihre fehlende Elastizität: Keramikklingen brechen leicht. Sie sind deshalb vor allem für industrielle Anwendungen geeignet, bei denen entsprechende Zuführungen ungünstige Winkel zwischen Schneide und Schnittgut verhindern.

Ein Qualitätsstahlmesser wird unter den gewaltigen Stößen eines tonnenschweren Fallhammers im »Gesenk« geschmiedet. Der Unterschied zum Freiformschmieden liegt darin, dass der Rohling beim Schmieden von einem geschlossenen Werkzeug umgeben ist, vergleichbar etwa dem Prägen einer Münze. Insgesamt durchläuft er etwa vierzig Arbeitsschritte. Unter anderem wird gegebenenfalls ein Griff angenietet und die Klinge je nach Verwendungszweck geschliffen: Für Fleisch oder Gemüse eignet sich eine glatte Schneide, harte Schalen oder feste Krusten bewältigt der Wellenschliff, faserige Objekte eine Klinge mit Sägeprofil. Ein spezieller Polierschliff (das »Pließten«) lässt sie noch blau schimmern – fertig.

Durch die Benutzung stumpft das Messer aber nach und nach ab. Abhilfe schafft das gelegentliche Abziehen am Stahl, der übrigens immer magnetisch ist, damit die Feilspäne nicht an der Klinge haften bleiben. Abwechselnd streicht man mit beiden Seiten des Messers etwa zwanzigmal darüber. So bildet sich wieder ein feiner Grat. Bei hochwertigen Klingen lohnt es sich zudem noch nach Jahrzehnten, das Messer zur Aufarbeitung an den Hersteller einzusenden. ◁

Der Autor **Alexander Glück** ist Wissenschaftsjournalist in Wien.



GÜDE, SOLINGEN

Die berühmte Damaszenerklinge (oben) war dank einer ausgefeilten Fertigung gleichzeitig elastisch und hart. Selbst das einfache Gebrauchsmesser erfordert zahlreiche Arbeitsschritte (rechts Solinger Messerschmiede 1910).

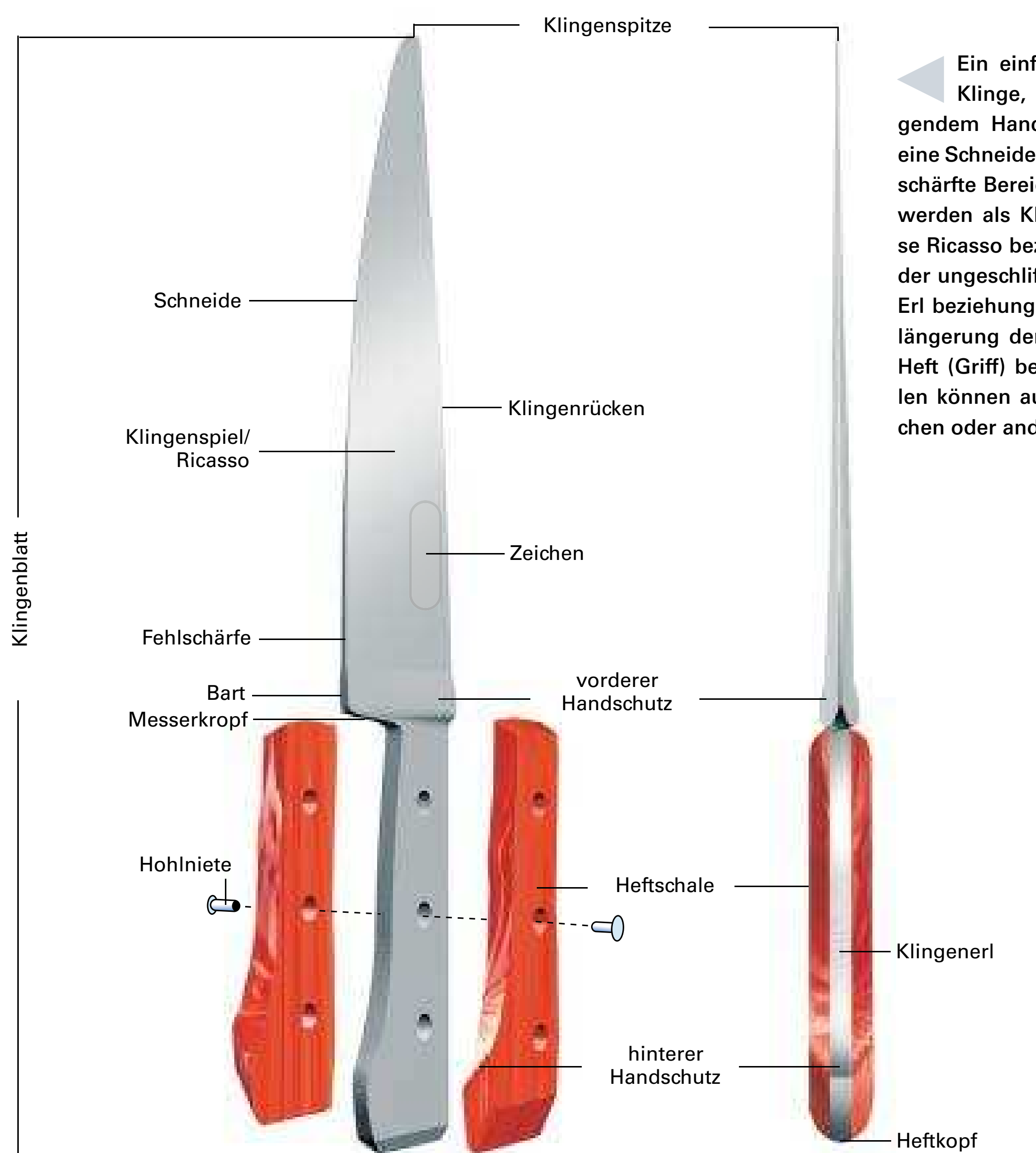
WUSSTEN SIE SCHON?

Indem er von großen Kieselsteinen Kanten abschlug, erschuf der *Homo habilis* vor 2,5 Millionen Jahren in Ostafrika erstmals ein Werkzeug, das sich zum Beispiel zum Aufschlitzen toter Tiere eignete. Etwa eine Million Jahre später entstanden in Afrika erste Faustkeile mit scharfer Schneide (in Europa vor etwa 600000 Jahren). Der Neandertaler schließlich verfeinerte die Techniken und schlug vor etwa 100000 Jahren in Europa feine Klingen aus Feuerstein.

Bereits im 14. Jahrhundert gab es rund um die Klinge verschiedene Zünfte für die unterschiedlichen Arbeitsvorgänge wie das Schmieden, Härten, Schleifen und Montieren. Das Schneidwarenhandwerk entwickelte sich aus der Schwertfertigung. 1571 wurde die Zunft der Messerschmiede in Solinger Urkunden erstmals erwähnt.

Im 4. Jahrhundert zerfeilte Wieland der Schmied ein schlechtes Schwert, mischte die Späne mit Mehl und Milch und gab sie Vögeln zu fressen. Deren Kot glühte er zu neuem Stahl. Im Jahr 1939 wiederholte man das Rezept – und staunte über die gleichmäßige Verteilung von Kohlenstoff und Stickstoff im Stahl.

Gegenstände, die ihrem Wesen nach dazu bestimmt sind, unter unmittelbarer Ausnutzung der Muskelkraft durch Hieb, Stoß, Stich, Schlag oder Wurf Verletzungen beizubringen, fallen unter das Waffengesetz. Wer zum Beispiel ein Militärmesser bei einer öffentlichen Veranstaltung mit sich führt, macht sich strafbar. Gänzlich verboten sind Spring- und Fallmesser, deren Klingen auf Knopfdruck aus dem Griff hervorschnellen oder -geschleudert werden können.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein einfaches Messer besteht aus Klinge, Griff und dazwischen liegendem Handschutz. Die Klinge besitzt eine Schneide, eine Spitze sowie nicht geschärfte Bereiche: Die seitlichen Bereiche werden als Klingenspiel beziehungsweise Ricasso bezeichnet, die Fehlschärfe ist der ungeschliffene Bereich zum Griff hin. Erl beziehungsweise Angel heißt die Verlängerung der Klinge, mit der diese am Heft (Griff) befestigt wird. Die Griffschalen können aus Holz, Horn, Metall, Knochen oder anderen Materialien bestehen.

WISSENSCHAFT

Gero von Randow (Hg.)

Jetzt kommt die Wissenschaft

Von Wahrheiten, Irrtümern und kuriosen Erfindungen

Frankfurter Allgemeine Buch im F.A.Z.-Institut, Frankfurt am Main 2003. 264 Seiten, € 34,–



Seit drei Jahren ist die Wissenschaftsdoppelseite der »Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung« (F.A.S.) lieb gewordener Teil meines Sonntagsfrühstücks, auch wenn das monumentale Format Gorillaarme erfordert und regelmäßig in Konflikt mit dem Marmeladenbrötchen gerät. Ein flott geschriebener Lauftext führt den Leser jede Woche auf zwei Seiten durch ein anderes Thema. Informationen, die den Lesefluss stören würden, werden in opulente Grafiken, schematische Darstellungen oder Faktenkästen ausgelagert. Deshalb war die Begegnung mit der vorliegenden Kompilation ein freudiges Wiedersehen.

Die Geschichte des Anatomen Justus Christian Loder, von Tilman Spreckelsen im Artikel »Für ihn war jede Leiche schön« anschaulich geschildert, fehlt ebenso wenig wie »Die Formel des Dr. Drake«: Schritt für Schritt wird der Leser in die umstrittene Gleichung eingeführt, mit welcher der US-Astronom Frank Drake die Zahl der Planeten mit intelligentem Leben berechnen will. Das klingt phänomenal, scheitert aber an fehlenden Daten über das Universum, wie der Autor Ulf von Rauchhaupt demonstriert.

In dem Kapitel »Blut, Schweiß und Tränen« nähert sich Jan Schweitzer dem anrüchigen Bereich der Körperausscheidungen, während das »lichtlose Gesindel« von Jörg Albrecht sich als Gruppe faszinierender Tiefseegeschöpfe entpuppt. Am interessantesten sind aber die Beiträge, in denen den Autoren die seltene Symbiose zwischen Wissenschaft und Unterhaltung gelingt. Etwa »Gut ausgedacht, trotzdem ausgelacht« von Gero von Randow über die Frage, warum bestimmten Erfindungen der Durchbruch versagt blieb, wie dem Plastikfahrrad oder dem eckigen Lenkrad. Augenzwinkernd wird daraus sogleich ein neuer Zweig der Technikgeschichte, die »Floppologie«.

Ein Beitrag von Klemens Polatschek überrascht nicht nur mit einem Stammbaum der Staubsaugerbeutel, sondern auch mit der Erkenntnis, dass Deutschland innerhalb der EU »das einzige größere Land mit einer eigenständigen und bedeutenden nationalen Staubsaugerbeutel-Industrie« ist. Von fiktiven Elementen wie Kryptonit und explosiven Verbindungen wie Vehemit oder Duckamit erzählt der peppig aufgemachte Artikel »Chemie in Entenhausen« von Andreas Platthaus.

Von den mehr als hundert Doppelseiten, die in den Jahren 2001 bis 2003 in der »F.A.S.« veröffentlicht wurden, haben 38 Eingang in das vorliegende Buch gefunden. Der durch das Buchformat erhöhte Lesekomfort wird allerdings mit dem Verzicht auf besonders schöne grafische Spielereien erkauft: So musste die prächtige Marskugel in von Rauchhaupts »Einmal zum Mars und (hoffentlich) wieder zurück« in zwei Hälften zerteilt werden. Und die Zahl π, die in Albrecht Beutelspachers »Kreise, Kugeln, Zufälle: Überall spukt π herum« mit ihren Nachkommastellen als Kreis die π-Formel des indischen Mathematikers Srinivasa Ramanujan umschließt, läuft im Buch ganz unspektakulär geradeaus über acht Seiten. Manche Verweise auf weiterführende Grafiken wurden nicht an die neue Gestaltung angepasst.

Was für treue »F.A.S.«-Leser eine repräsentative und zudem kleckerfreie Darreichungsform bekannt guter Ware darstellt, das ist für alle anderen ein unterhaltsamer Querschnitt aus der Welt der Wissenschaft. Dabei scheuen die Autoren auch vor ungewöhnlichen und schwierigen Themen nicht zurück. Komplexe Sachverhalte erklären sie verständlich, fast spielerisch, gleiten aber niemals ins Infantile ab. Deshalb ist das gewichtige Werk auch für diejenigen eine gute Wahl, die bisher die vermeintlich trockene Wissenschaft gescheut haben.

Oliver Koch

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.



Die Tanzlinde zu Effeltrich in Oberfranken diente jahrhundertelang der Gerichtsbarkeit – und dem Vergnügen. Aus dem Buchkapitel »Bäume, wollt ihr ewig leben?« von Jörg Albrecht


ANZEIGE

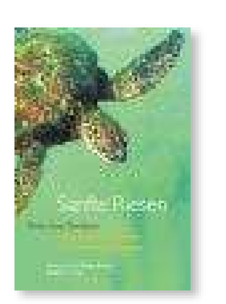
ZOOLOGIE

Osha Gray Davidson

Sanfte Riesen

Das rätselhafte Sterben der Meeresschildkröten

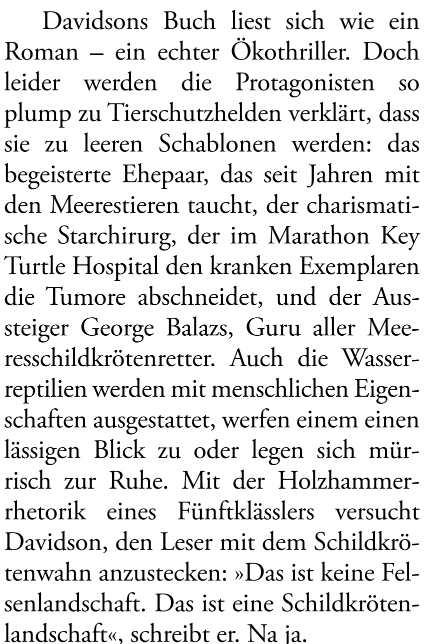
Aus dem Amerikanischen von Monika Rößiger.
marebuchverlag, Hamburg 2003. 330 Seiten, € 26,90



Dieses Bild einer von Tumoren befallenen Schildkröte entstand 1995. Danach wurde sie nicht mehr gesehen.



Meeresschildkröten sind faszinierende Tiere, findet Osha Gray Davidson, seitdem er bei einem Tauchgang vor der Westküste Mauis zum ersten Mal einer begegnete. Auf seiner Reise lernte der amerikanische Journalist und Buchautor Menschen kennen, die sich der Rettung dieser bedrohten Tiere verschrieben haben. Die Hobbytaucher, Meeresbiologen und Tierärzte kämpfen gegen eine rätselhafte Epidemie, die Fibropapillomatose (FP). Unzählige Tumore überwuchern Augen, Maul, Panzer, Bauch und Extremitäten infizierter Schildkröten, die unaufhaltsam daran zu Grunde gehen. 1936 im New Yorker Aquarium im Battery Park an der Südspitze Manhattans entdeckt, breitete sich die mysteriöse Krankheit in den Weltmeeren aus – sechs der sieben Arten von Meeresschildkröten sind bis heute betroffen.



Davidsons Buch liest sich wie ein Roman – ein echter Ökothriller. Doch leider werden die Protagonisten so plump zu Tierschutzhelden verklärt, dass sie zu leeren Schablonen werden: das begeisterte Ehepaar, das seit Jahren mit den Meerestieren taucht, der charismatische Starchirurg, der im Marathon Key Turtle Hospital den kranken Exemplaren die Tumore abschneidet, und der Aussteiger George Balazs, Guru aller Meeresschildkrötenretter. Auch die Wasserreptilien werden mit menschlichen Eigenschaften ausgestattet, werfen einem einen lässigen Blick zu oder legen sich mürrisch zur Ruhe. Mit der Holzhammerrhetorik eines Fünftklässlers versucht Davidson, den Leser mit dem Schildkrötenwahn anzustecken: »Das ist keine Felsenlandschaft. Das ist eine Schildkrötenlandschaft«, schreibt er. Na ja.

Und das Drama nimmt seinen Lauf – inhaltlich wie sprachlich. Die Helden aus der Tierklinik können zwar Schildkröte Buddy retten, aber für den kleinen Jonathan, der bereits am ganzen Körper mit Tumoren übersät ist, kommt jede Hilfe zu spät. Er stirbt, bevor er operiert werden kann. Erschüttert durch Jonathans Ableben gerät der Autor ins Grübeln über Leben und Tod im Allgemeinen: »Wir sind alle sterblich, egal ob Mensch oder Schildkröte, und niemand kann dem Tod entrinnen. Aber es ist nicht nur das Wissen um unsere gemeinsame Sterblichkeit, die Jonathans leblosen Körper in jener Nacht vor meinen Augen auftauchen lässt und seitdem in vielen Nächten. Es ist das Wissen, dass es für jeden geretteten ›Buddy‹ Tausende von ›Jonathans‹ gibt, die dieser Plage zum Opfer fallen werden.« Vielleicht kann Davidson damit Kinder für die Meeresschildkröten begeistern und womöglich auch einige Teenager in großen Weltschmerz stürzen. Doch die meisten Leser – vor allem solche, die sich mit Naturschutz und Ökologie auskennen – werden sich von dem Autor nicht erziehen lassen wollen.

Schade, denn hinter dem innigen Geschwafel verbergen sich eine tolle Geschichte und ein brisantes Thema. In der Tat ist es bemerkenswert, wie sich die Menschen, deren Kampf Davidson dokumentiert, für den Schutz und die Rettung der Meeresschildkröten einsetzen. Und sicherlich ist es wichtig, die Öffentlichkeit darauf aufmerksam zu machen, dass diese Tiere – wie viele andere – be- ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Ulrich Janßen und Ulla Steuernagel

Die Kinder-Uni, Zweites Semester

Forscher erklären die Rätsel der Welt

dva, Stuttgart 2004, 223 Seiten, €19,90

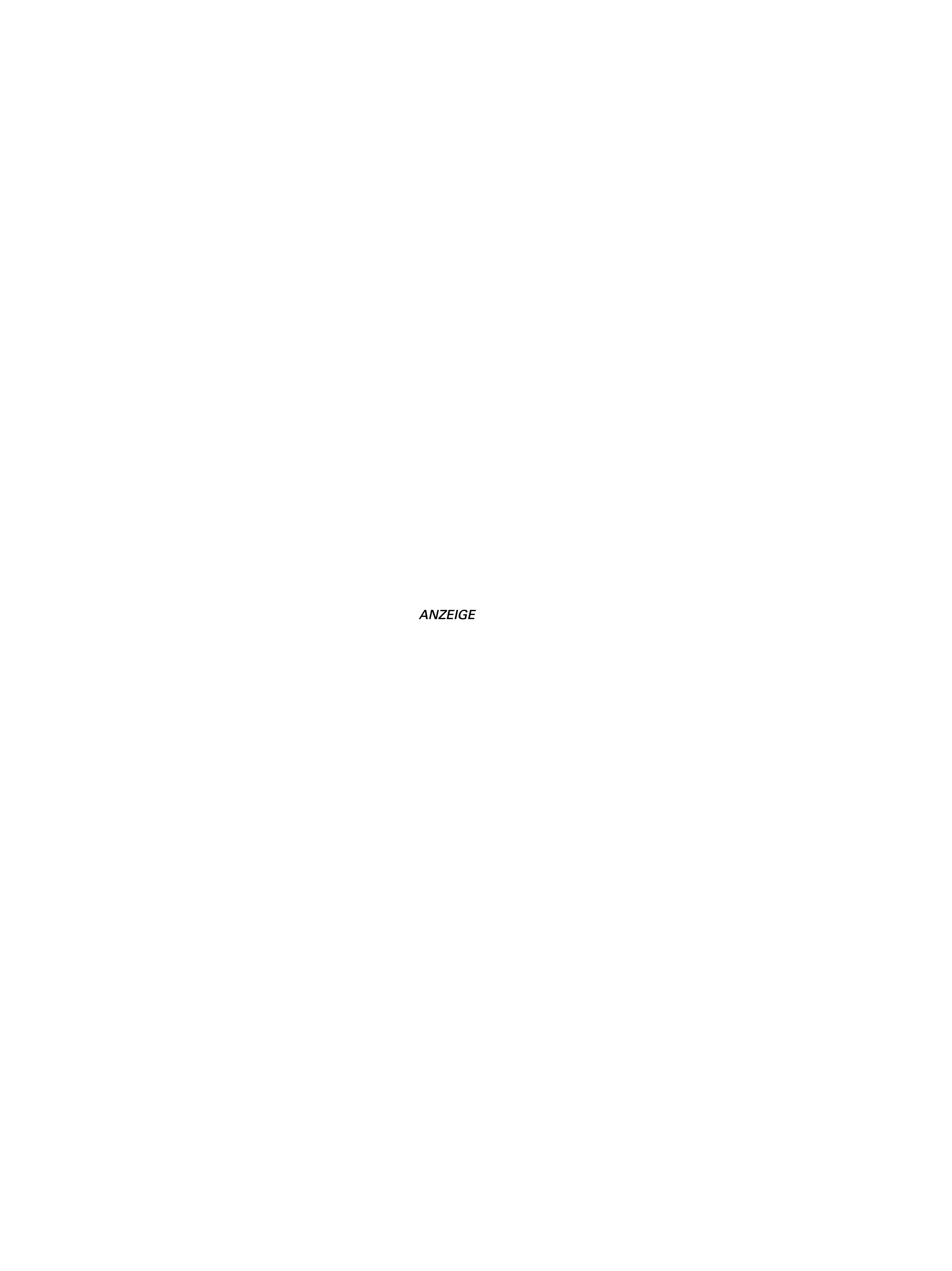
Häufig halten Fortsetzungen erfolgreicher Filme oder Bücher nicht das, was sie versprechen. Mit Vorschusslorbeeren bedacht, profitieren sie vom Erfolg des Originals und entpuppen sich beim genauen Hinsehen als einfache Kopie. Nicht so bei der »Kinder-Uni«. Allerdings wird im zweiten Semester – ganz wie im richtigen Studentenleben – der Inhalt anspruchsvoller, ohne aber den Bezug zur Welt der Zehn- bis Dreizehnjährigen zu verlieren.

Wie schon in der ersten Folge der »Kinder-Uni« wurde der »Mitschrieb« der acht Vorlesungen von Ulla Steuernagel und Ulrich Janßen zu lesenswerten Buchkapiteln erweitert und von Klaus Ensikat meisterlich illustriert.

Aus der Rezension von Daniel Dreesmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5


ANZEIGE

▷ droht sind. Es ist auch richtig, dass das Sterben der Meeresschildkröten nur eine von unzähligen Umweltkatastrophen ist, die größtenteils durch den Menschen verursacht wurden.

In den USA wurde das Buch hoch gelobt. Vielleicht liegt es daran, dass die Amerikaner grundsätzlich gerne aus dem Vollen schöpfen, was das Stilisieren von Helden angeht – womit so mancher Europäer ja auch bei Hollywoodstreifen so seine Probleme hat.

Ein schönes Kinderbuch – mehr nicht.

Dagny Lüdemann

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.



PHYSIK

Lutz Castell, Otfried Ischebeck (Hg.)

Time, Quantum and Information

Springer, Berlin 2003. 456 Seiten, € 53,45

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie gibt es im Kosmos Objekte von so ungeheurer Gravitationskraft, dass aus ihrem Inneren keinerlei Informationen, auch nicht in Form von Licht, nach außen dringen können; sie werden deshalb als Schwarze Löcher bezeichnet. Eines der vielen Rätsel, die sie umgeben, war lange Zeit die Größe ihrer Entropie (siehe »Das holografische Universum« von Jacob Bekenstein, Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34). Nach der herkömmlichen Definition ist die Entropie ein Maß für den Informationsgehalt eines Objekts; sie berechnet sich aus der Zahl seiner inneren Zustände, in denen es dieselben Eigenschaften hat. Damit hängt sie davon ab, welche Eigenschaften man zur Beschreibung des Objekts wählt und wie detailliert man seine inneren Zustände beschreibt. Entropie und Information sind also relative, vom Kontext einer bestimmten Beschreibung abhängige Maße. je detaillierter die Beschreibung seiner inneren Zustände, desto größer die Entropie. Nicht so bei einem Schwarzen Loch: Da es alle Informationen über sein Inneres verbirgt, ist seine Entropie die Obergrenze für alles, was man überhaupt darüber wissen könnte, unabhängig von irgendwelchen Modellen seiner Struktur. Information wird damit zu einer unabhängigen Eigenschaft eines Objekts und zu einer absoluten physikalischen Größe. Das ist ein radikaler Bruch im Verständnis von Information.

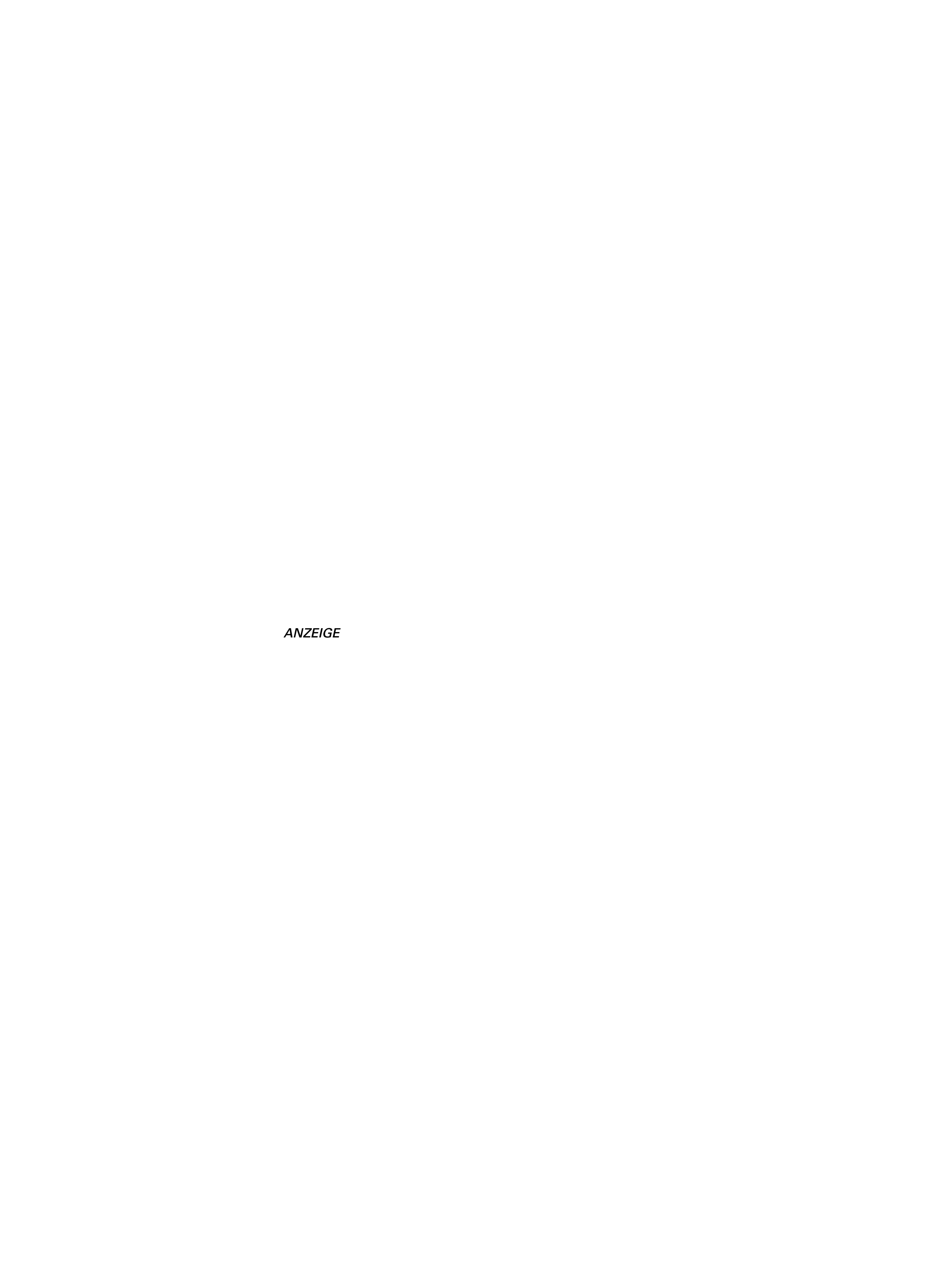
Mit Hilfe der von Bekenstein vor dreißig Jahren angegebenen Formel kann man berechnen, wie die Entropie eines Schwarzen Lochs von der Größe unseres Universums dadurch zunimmt, dass von außen ein Proton hineinstürzt. Diese Änderung lässt sich als der Informationsgehalt des Protons selbst interpretieren: Es sind 10^{40} Bit, ein Wert, der im Rahmen der etablierten Physik eigentlich nicht erklärbar ist.

Zu genau diesem Ergebnis war schon einige Jahre zuvor Carl Friedrich von Weizsäcker auf völlig anderem Weg gekommen. Die von ihm entwickelte Urtheorie ist der radikale Versuch, die gesamte Naturwissenschaft, mit der Quantentheorie an der Spitze, auf den Informationsbegriff zurückzuführen: Ure sind nichts weiter als die Quantenbits (»Qubits«), die im Zusammenhang mit den Quantencomputern zu Ehren gekommen sind. Dabei setzt die Urtheorie nicht einmal die Struktur des Raumes voraus; diese ergibt sich erst aus der Verknüpfung der kleinsten Informationseinheit, der Entscheidung zwischen zwei Möglichkeiten, und der Quantentheorie. Bis heute ist die Urtheorie ein Fragment geblieben; so ist es nicht gelungen, eine Theorie der Wechselwirkung der Ure zu entwickeln, die schließlich zu einer Theorie der Elementarteilchen führen sollte.

Der vorliegende Sammelband ist von Weizsäcker zu seinem 90. Geburtstag gewidmet; die sehr wenigen Forscher, die an der Urtheorie weitergearbeitet haben, kommen in mehreren Beiträgen zu Wort.

Der Frankfurter Physiker Thomas Görnitz fasst seine eigenen einschlägigen Arbeiten zusammen. Dazu gehört die oben genannte Verknüpfung der Entropie Schwarzer Löcher mit der Urtheorie, die für Görnitz die »zentrale Anbindung« an die etablierte Physik ist. Ausgehend von den heute bekannten Größenordnungen für Radius und Dichte des Universums kommt er zu Abschätzungen für die Entropie des gesamten Universums ▷

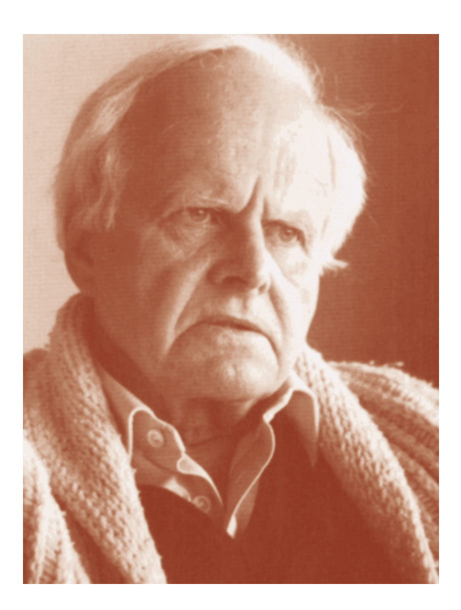

ANZEIGE


ANZEIGE

▷ und die Anzahl der darin enthaltenen Nukleonen und Photonen, die nach seiner Aussage mit den empirisch bekannten Daten gut übereinstimmen. Das gelte auch für die Energie der Photonen im Universum, der so genannten »kosmischen Hintergrundstrahlung«. Die Verknüpfung der Urtheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie führe zu einem plausiblen kosmologischen Modell, in dem sich die extreme Kleinheit der »kosmologischen Konstanten«, der Vakuumenergie des Kosmos, in natürlicher Weise ergebe. Für die etablierten Theorien stelle dies ein erhebliches Problem dar.

Während sich die Beiträge zur Urtheorie an Spezialisten wenden, finden sich zu anderen Arbeitsgebieten von Weizsäckers eher allgemeinverständliche Darstellungen: Astro- und Kernphysik mit den thermonuklearen Prozessen in Sternen und der Entstehung der Planetensysteme sowie die Philosophie der Naturwissenschaft und der Zeit – alles in der für solche Festschriften typischen bunten Mischung. Hervorgehoben sei die Darstellung des Hamburger Friedensforschers Götz Neuneck zur deutschen Atomforschung während des Zweiten Weltkriegs und zu den nachfolgenden Bemühungen internationaler Wissenschaftler, die Institution des Kriegs nach dem Bau der Atombombe abzuschaffen. In beiden hat von Weizsäcker eine herausragende Rolle gespielt.

Ein wichtiges Thema des Buchs sind die Grundlagen der Quantentheorie. Mit der Charakterisierung von Objekten durch Information ist die Urtheorie eine radikale Weiterführung der »Kopenhagener Deutung«, jener orthodoxen, aber von vielen Physikern nur mangels einer überzeugenden Alternative akzeptierten Interpretation der Quantentheorie. Ein seit deren Anfängen andauernder Streit geht darum, ob die Wellenfunktion, die Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse vorhersagt, gemäß der Kopenhagener Deutung das mögliche Wissen eines Beobachters darstellt oder eine davon unabhängige Realität beschreibt. Wie lebendig diese Debatte ist, machen mehrere Beiträge in diesem Buch deutlich.



Das Buch ist dem Physiker und Philosophen Carl Friedrich von Weizsäcker zum 90. Geburtstag gewidmet.

Hans Primas und Harald Atmanspacher lösen den Widerspruch nach dem Muster des Teilchen-Welle-Dualismus auf: Beide Positionen beruhen auf unterschiedlichen Auffassungen der Wirklichkeit, die beide für eine Beschreibung der Natur je nach der zu Grunde liegenden Fragestellung notwendig seien. Claus Kiefer erläutert das Phänomen der »Dekohärenz«, wonach der quantenmechanische Messprozess in neuem Licht erscheine, wenn auch die Kopplung des Messgeräts an seine Umgebung berücksichtigt werde, denn unrealistische Überlagerungszustände im Messprozess wie die berühmte sowohl tote als auch lebendige »Schrödinger'sche Katze« seien bereits durch die Quantenmechanik selbst ausgeschlossen. Spätestens wenn der Kosmos als Ganzes betrachtet werde, komme die Kopenhagener Deutung an ihr Ende, denn hier gebe es keinen Beobachter mehr, für den die quantentheoretischen Möglichkeiten zu Fakten werden könnten.

Einen interessanten Vorschlag machen schließlich Ceslav Brukner und Anton Zeilinger von der Universität Wien. Ganz in von Weizsäckers Sinn, die Naturwissenschaft auf Ja-Nein-Aussagen zurückzuführen, streben sie nach einer Herleitung der Quantentheorie aus der Informationstheorie. Ihr Ausgangspunkt ist die Annahme, dass jedes physikalische Objekt einen endlichen Informationsgehalt hat. Da diese Information aber nicht ausreiche, um die Resultate aus allen möglichen Messungen festzulegen, könne eine bestimmte Messung nicht mehr mit Sicherheit vorhergesagt werden. Der ▷

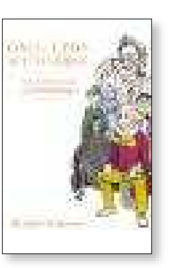
ANZEIGE

▷ Indeterminismus der Quantentheorie ist damit auf ein fundamentaleres Prinzip zurückgeführt.

Viele Autoren heben die Bedeutung von Weizsäckers Fragen und Antworten als Quelle der Inspiration und als Herausforderung an die etablierte Wissenschaft hervor, die in ihrer Vorausschau noch nicht an ihr Ende gekommen sei. Dem ist wenig hinzuzufügen.

Sebastian Stier

Der Rezensent ist Physiker und promovierter Informatiker; er arbeitet im Bereich Mobiltelefone bei der Siemens AG in München.



PHYSIK

Robert Gilmore

Once upon a Universe

Not-so-Grimm Tales of Cosmology

Copernicus Books, New York 2003. 227 Seiten, $ 25,–

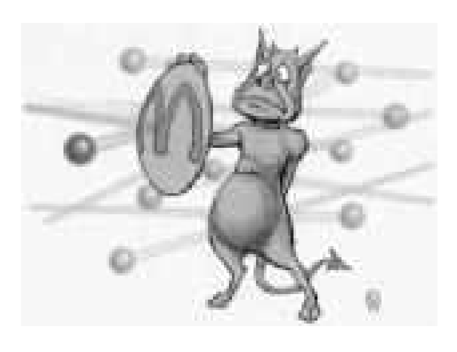
Es war einmal ein Universum«: Robert Gilmore will uns die Geschichte des Kosmos als Märchen erzählen – wundersam genug ist sie ja.

Prinzessin Aurora darf am Treffen der erfolgreichsten Weltmodelle teilnehmen, die gerade ihr neues Projekt »Das Universum« ins Leben rufen. Ein Mitarbeiter des Projekts nimmt sich der verwirrten Königstochter an. Aber so subtile Punkte wie etwa die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie oder die inflationäre Phase sind nicht so schnell zu erklären.

Gilmore hat die schwere Kost deshalb auf sechs Märchen aufgeteilt. In den ersten vier bereisen die Helden verschiedene Räume des physikalischen Theoriengebäudes. Relativität und Bewegung, Quantenwelt, Astronomie und Raumzeit sind die Themen, die auf das fünfte Märchen vorbereiten. In diesem passiert schließlich der Urknall, und die Geschichte des frisch entstandenen Alls wird in logarithmischem Zeitraffer erzählt, sodass jeder einzelnen Phase annähernd gleich viel Platz gegeben wird. Im sechsten und letzten Teil verblassen die entstandenen Sterne wieder, und die ungewisse Zukunft des Kosmos lässt den Zuhörer am Ende des Buchs nachdenklich werden.

Wenn er Gilmores Werk bis zum Ende gefolgt ist. Wahrscheinlich hat er aber vorher das Buch entnervt zur Seite gelegt. Was der englische Wissenschaftsautor erzählt, sind nämlich eigentlich gar keine Märchen. Keine spannende Handlung, keine echten Bösewichte und am – unerwarteten – Ende keine Moral von der Geschichte. Insofern trifft der Untertitel des Buchs voll zu: Diese Märchen sind wirklich »not-so-Grimm«.

Woran liegt es, dass »Once upon a Universe« ein Langweiler ist? Ein Beispiel: Im vierten Märchen fliegen dem Zuhörer auf nur vier Seiten Pulsare, Gravitationswellen, scheinbar überlichtschnelle Jets und Akkretionsscheiben um die Ohren – zu viel auf zu wenig Raum. Thematische Sprünge über viele Größenordnungen hinweg hängen jeden ab, der sich zum ersten Mal mit Kosmologie beschäftigt. Ebenso wenig helfen dem verlorenen Zuhörer die zahlreichen Verweise auf das frühere Buch des Autors »The Wizard of Quarks«.



▲ **Verzweifelt versucht der Maxwell'sche Dämon der Thermodynamik die Luftmoleküle zu geordneter Bewegung zu veranlassen.**

Einen Zusammenhang zwischen dem Geschehenen und dem Gesehenen sucht man vergeblich. Würde man nicht erwarten dürfen, dass der Schlüssel zur Lösung der jeweiligen Geschichte irgendwie in der Physik der besuchten Objekte liegt?

Es gibt bessere und spannendere Einführungen in die Kosmologie und auch schönere Märchen. Zum Beispiel die der Brüder Grimm.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

Aus urheberrechtlichen Gründen
können wir Ihnen die Bilder leider
nicht online zeigen.

Im R4 ist viel Platz

Wer unversehens in den $\mathbb{R}^4$ gerät, erlebt eine ungeahnte Reichhaltigkeit an geometrischen Körpern – und die eigene Beschränktheit.

Von Christoph Pöppe

Kennen Sie noch den alten R4? Krückstockschaltung, gewöhnungsbedürftige Straßenlage, nichts für die Anhänger einer sportlichen Fahrweise. Keine Materialverschwendung für Komfort oder Lärmminderung – aber viertürig und erstaunlich geräumig, vorausgesetzt, man war bereit, den eigenen Körper und das Gepäck in geeigneter Weise zusammenzufalten.

In einem solchen Gefährt fand ich mich wieder, nachdem ich über die papierne Datenbank in der Mensa eine Mitfahrgelegenheit nach Berlin gefunden hatte (die Geschichte ist schon reichlich zwanzig Jahre her). Wir waren fünf Leute samt Rucksäcken, hatten uns mit beträchtlicher Mühe in dem Auto verstaut, die Fahrt versprach lang zu werden, und ich versuchte ein bisschen zu schlafen.

Auf einmal war es überall ziemlich hell. Das musste der Grenzkontrollpunkt sein. Ich blinzelte und griff unwillkürlich nach meinem Reisepass – aber irgendetwas stimmte nicht. Noch nie hatte ich in einem Auto den schwer zugänglichen Hohlraum unter den Vordersitzen so gut beleuchtet gesehen. War das eine Spezialität des R4?

Dann hatte ich das unangenehme Gefühl, dass jemand seine Aufmerksamkeit sehr speziell auf mich richtete, auch wenn ich mir nicht vorstellen konnte warum. Mein Pass war noch gültig, und ich hatte nichts bei mir, das den Grenzorganen der DDR hätte missfallen können.

Das Gekicher, das unlokalisierbar von allen Seiten her an mein Ohr drang, wirkte sehr unamtlich. Und dann der Ausruf: »Der ist ja sowas von dünn!«

Ich schloss beruhigt die Augen und klappte mich wieder auf dem Sitz zusammen. Man kann mir ja einiges nachsagen; aber dünn bin ich nun wirklich nicht. Die mussten jemand anders meinen. Nur: Wieso war es bei geschlossenen Augen immer noch so hell?

Nicht um die Kragenebene knicken!

»Wieso der?« fragte eine andere Stimme. »Sieht man doch, dass das ein Männchen ist«, kam die Antwort. Plötzlich fühlte ich mich an intimer Stelle unangenehm berührt, schrak hoch, überprüfte hastig meine Kleidung – aber daran war nichts zu beanstanden.

Die Berührung wechselte zu meinen eingeklemmten Füßen, und dann geschah etwas noch Seltsameres: Meine Füße waren mit einem Mal verschwunden! Zumindest sah ich sie nicht mehr, und der Rucksack, unter dem sie gesteckt hatten, hörte plötzlich auf zu drücken. Stattdessen fühlte es sich so an, als wollte jemand meine Knie überstrecken: jene charakteristische Bewegung, mit der man beim Hühnerbein den einen Knochen vom anderen löst.

»Vorsicht«, kam wieder eine Kicherstimme. »Verknick ihn nicht.«

Aber es tat überhaupt nicht weh. Vorübergehend bekam ich auch meine Füße wieder zu sehen. Überall, von innen wie von außen, fassten irgendwelche Hände mich an, wilde Lichteffekte schwirrten um mich her; dann beruhigte sich allmählich die ganze Szenerie. Ich fand mich auf einer Art weißem Tisch sitzend wieder, vollständig und, soweit erkennbar, unversehrt.

Ich wackelte mit dem Kopf – alles in Ordnung. Nur dieses schattenlose, diffuse Licht ohne eine erkennbare Lichtquelle war nach wie vor höchst verwirrend. Ich wackelte etwas heftiger mit dem Kopf – und wieder war alles durcheinander. Heftiges Lichtgeflacker, ich sah wieder nichts von mir selbst, und große Aufregung unter den unsichtbaren Kicherstimmen: »Pass auf, er fällt ♦wärts!« Und wieder fassten mich unzählige Hände und setzten mich zurecht.

Mit dem Zeichen ♦ versuche ich eine Art Würgelaut wiederzugeben, den ich so noch nie gehört hatte. Erst später wurde mir seine Bedeutung klar.

Anscheinend wurde ich besichtigt. Augenpaare tauchten aus dem Nichts auf und verschwanden wieder, gelegentlich konnte ich ein erstauntes Gesicht dazu sehen, einige besonders Vorwitzige schienen mit den Fingern in mir herumzustochern – jawohl, in mir. Es fühlte sich sehr merkwürdig an, wie eine verschärfte Form von Nasebohren. Nachdem ich mehrfach erschrocken zusammengezuckt war, ließ man von mir ab.

»Knick ihn doch noch einmal um diese Ebene«, schlug eine der Stimmen vor und fasste mich um und in meinen Bauch. Noch bevor ich ernsthaft in Panik geraten konnte, verspürte ich wieder dieses Knirschgefühl, mein Unterleib verschwand im Unsichtbaren – aber es tat wieder nicht weh.

»Kopf hoch«, flüsterte ich mir selbst zu, »anscheinend geht es mir noch nicht an den Kragen.«

»Nicht Kopf hoch«, erwiderte eine der Stimmen. »Kopf ♠!« ♠ war ein anderer Würgelaut, den ich ebenfalls noch nie gehört hatte. »Um die Kragenebene abknicken.« Hilfreiche Hände packten mich am (im?) Kopf, es knirschte nur ganz wenig, aber mich packte die blanke Angst um meine Halswirbel. Wieder tanzten die Lichteffekte um mich, meine Arme wurden unsichtbar, dafür tauchten auf einmal meine Füße dicht vor meiner Nase auf. Ich hätte ohne weiteres an meinem großen Zeh nuckeln können, was mir seit Kleinkindertagen nie wieder gelungen war. Das Merkwürdigste war: Ich fühlte mich überhaupt nicht verkrümmt! ▷

▷ Offensichtlich war ich nicht der Einzige, der staunte. Von allen Seiten her erschienen Augenpaare aus dem Nichts und betrachteten mich intensiv, hektisches Geflüster setzte ein, und dann die entscheidende Bemerkung: »Der ist nicht bloß dünn – ist der vielleicht dreidimensional?«

Was für eine Frage! »Natürlich bin ich dreidimensional«, erwiderte ich mit einer gewissen Entrüstung. »Ich habe eine Länge, eine Breite und eine Dicke, und das nicht zu knapp. Das wäre ja fürchterlich, wenn ich zweidimensional wäre. Platt wie eine ausgebreitete Frischhaltefolie, und beliebig verknitterbar.«

Eine meiner Gesprächspartnerinnen nahm plötzlich diesen ganz besonders therapeutischen Tonfall an. Offensichtlich versuchte sie, mir schonend etwas beizubringen, das ich kaum zu verstehen im Stande wäre. »Ich fürchte, du bist dreidimensional, platt und beliebig verknitterbar. Es wäre kein Problem, dich handlich zusammenzurollen.«

»Wie?«

»Na, ganz einfach. Wir heben deinen Kopf ◆, rollen ihn ein, und der Rest geht dann ganz einfach …«

»Bitte nicht. Aber welche Richtung ist ◆?«

»Was für eine Frage! Beweg dich einfach ein bisschen« – und schon griff mir jemand hilfreich in die Arme: »Rechts, links, vorne, hinten, oben, unten …« wieder dieses Knirschgefühl, »… ◆ und ◆. Ist doch eigentlich ganz klar.«

Jetzt endlich begriff ich. »Seid ihr etwa vierdimensional?«

»Ja selbstverständlich. Von jedem Punkt aus kann man sich in vier Richtungen bewegen, die alle aufeinander senkrecht stehen – wie man leicht sieht.«

Ich sah es nicht. Nach einer Weile wurde den geheimnisvollen Unbekannten klar, dass mein Vorstellungsvermögen hier an unüberwindliche Grenzen stieß. Zum Glück bemerkten wir, dass uns ein Verständigungsmittel zur Verfügung stand, das von solchen Einschränkungen unabhängig war: die abstrakte Sprache der Mathematik. Reelle Zahlen waren uns geläufig, ebenso die Tatsache, dass man, wenn man sich erst einmal einen Nullpunkt und ein Koordinatensystem zugelegt hat, jeden Punkt im Raum durch drei reelle Koordinaten …

»Nein, vier reelle Koordinaten. Wir sind hier im $\mathbb{R}^4$.«

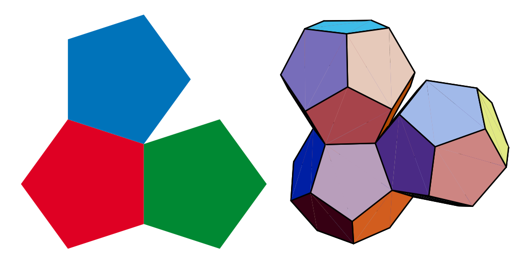
Leben in vier Dimensionen

Schon richtig. Mit $\mathbb{R}$ bezeichnet man die reelle Zahlengerade, $\mathbb{R}^2$ ist so etwas wie das Produkt der Menge $\mathbb{R}$ mit sich selbst, das heißt die Menge aller Paare reeller Zahlen oder auch das, was man normalerweise die Ebene nennt. Der uns umgebende Raum heißt entsprechend $\mathbb{R}^3$, und mehr gibt es nicht – dachte ich, bis ich in jenen merkwürdigen R4 stieg.

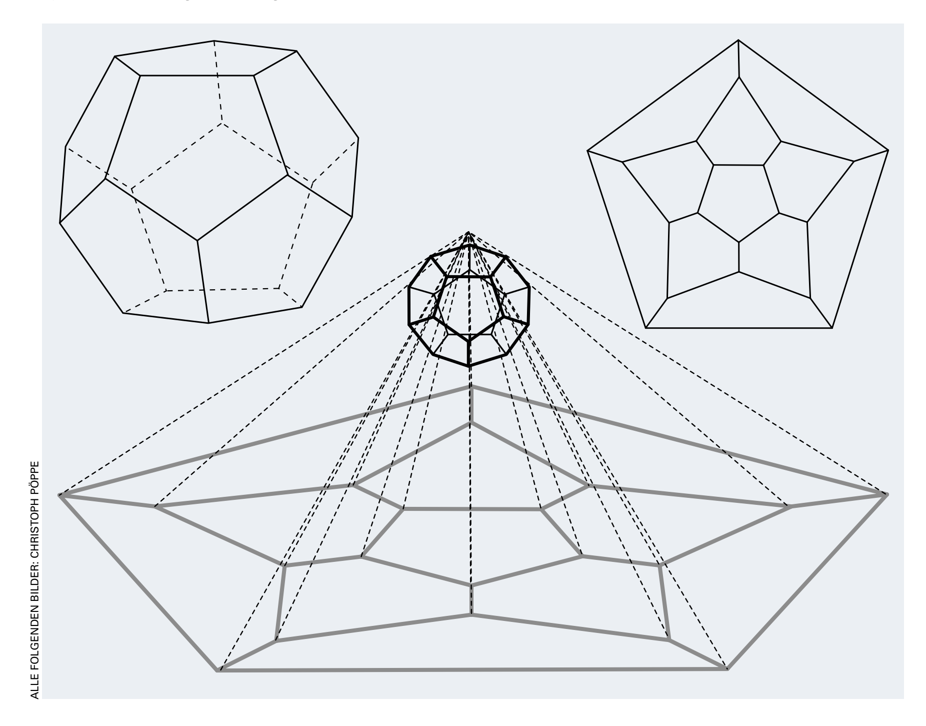
Das Leben in der Ebene muss ausgesprochen öde sein. Die Augen eines $\mathbb{R}^2$-Menschen sehen nicht ein zweidimensionales Bild, sondern nur eine Linie. Wer mit dem Blick nach Osten aus einem zweidimensionalen Ei geschlüpft ist, muss einen Kopfstand machen, um westwärts zu schauen (Norden und Süden gibt es sowieso nicht). Der Autor A. K. Dewdney hat die Bewohner seines »Planiversums« deshalb vorsorglich mit einem Ost- und einem Westauge ausgestattet. Knoten sind undenkbar, ebenso wie viele andere Dinge, die das Leben im $\mathbb{R}^3$ erfreulich machen. Ob es so etwas wie Elektrizität gibt, ist unklar; unsereins kann sich jedenfalls die Maxwell'schen Gleichungen in weniger als drei Dimensionen nicht vorstellen.

Wer immer über die $\mathbb{R}^2$-Welt nachdenkt oder gar ein Buch schreibt, den befällt unweigerlich ein gewisses Mitleid mit den armen, ach so beschränkten Kreaturen. Und siehe da: Auf einmal gingen meine $\mathbb{R}^4$-Freundinnen auffällig höflich und behutsam mit mir um. Offensichtlich hatten sie begriffen, wie beschränkt ich war.

Was geschieht mit einem $\mathbb{R}^2$-Menschen, wenn ein gewöhnlicher ($\mathbb{R}^3$-)



▲ Drei regelmäßige Fünfecke in der Ebene lassen eine Lücke, die durch Falten entlang der gemeinsamen Kanten geschlossen wird (links). Entsprechend schließt man im vierdimensionalen Raum die Lücke zwischen drei Dodekaedern, indem man sie gegeneinander faltet – entlang der gemeinsamen Ebenen.



ALLE FOLGENDEN BILDER: CHRISTOPH PÖPPE

◀ So macht man einem $\mathbb{R}^2$-Menschen ein Dodekaeder (links) begreiflich: Man setzt ein Drahtmodell auf die Ebene und hängt eine punktförmige Lichtquelle dicht über seine Deckfläche (Mitte). Der Schatten des Drahtmodells in der Ebene ist das Schlegel-Diagramm (rechts): Es besteht aus teilweise verzerrten Fünfecken, aber gewisse Eigenschaften, zum Beispiel dass sich in jeder Ecke drei Fünfecke treffen, bleiben erhalten.

Mensch ihn aus seiner Ebene heraushebt und zusammenfaltet? Nichts Schlimmes. Hinterher kann man ihn wieder glattlegen, und da er – für unsere Begriffe – unendlich dünn ist, bleibt noch nicht einmal eine Knickspur zurück. Aber in seiner Welt gibt es Drehungen nur um einen Punkt. Rotationen um eine ganze Achse sind für ihn unvorstellbar. Wenn bei einer solchen auch noch ein Teil von ihm aus seiner Welt herausgerät, wird er unweigerlich in Panik geraten.

Ich war durchaus dankbar, dass meine Freundinnen davon abließen, mich um eine Ebene zu knicken und mich dabei von innen zu berühren.

Sie zeigten mir eine Hauswand von außen – eine ganz gewöhnliche Ziegelmauer. Dass das, was ich für ein ganzes Haus gehalten hatte, nur eine seiner Wände war und fast das ganze Volumen mit Ziegeln ausgefüllt war, konnte ich nicht sehen. Ob man das Innere nicht hohl lassen könne? »Natürlich nicht. Dann zieht's doch rein. In der Mitte des Volumens ist ein Glasblock« – von dem ich nichts sehen konnte – »damit Licht hereinkommt.«

Dreidimensionale Schatten

Einer unter den $\mathbb{R}^4$-Damen fiel ein, wie man meinem Vorstellungsvermögen aufhelfen könnte: »Wir gehen einfach eine Dimension herunter. Projektion! Gib mir doch mal einen Schreibblock, ich will ihm etwas aufklotzen.«

Vor meinen Augen tauchte aus dem Nichts ein massiver Klotz aus Papier auf, wabbelte ein wenig und nahm dann wieder Quaderform an.

»Ach nein, gib mir lieber einen Overheadblock, sonst sieht er nichts im Inneren.«

Der Papierklotz verschwand und wurde durch einen durchsichtigen Klotz ersetzt. In dessen Mitte erschien die Spitze eines Filzstifts und zeichnete eine vertraute Figur – räumlich.

»Ihr Mathematiker steht doch so auf die platonischen Körper. Das hier ist ein Dodekaeder; es besteht aus zwölf regelmäßigen Fünfecken, die jeweils zu dritt an eine Ecke grenzen.«

Das Gebilde war mir geläufig.

»Jetzt überleg dir, wie du so ein Ding aus Papier machst.«

Da kannte ich mich aus. »Ich zeichne ein regelmäßiges Fünfeck auf Papier und an jede seiner Seiten ein gleichartiges Fünfeck. Zwischen den äußeren Fünfecken bleiben kleine keilförmige Lücken, die schneide ich heraus und knicke das ganze Gebilde entlang der Grenzen zwischen den Fünfecken, sodass die äußeren Fünfecke sich treffen. Das gibt ein halbes Dodekaeder, und die andere Hälfte geht genauso.«







▶ Die Projektion des 120-Zells in den $\mathbb{R}^3$. Die 120 Dodekaeder erscheinen in neun Schichten: zuinnerst das »Baby« (Mitte), klein, weiß und unverzerrt, darum der Reihe nach 12 blaue, 20 rote, 12 gelbe, 30 grüne, 12 gelbe, 20 rote und 12 blaue Dodekaeder, die immer größer und verzerrter werden (alle Dodekaeder einer Schicht sind kongruent). Das alle umschließende weiße Dodekaeder, der »Käfig« (oben), ist wieder unverzerrt.

»Nicht schlecht, wenn man bedenkt, wie beschränkt er ist«, kam ein Kommentar von dritter Seite. »Benimm dich«, versetzte meine Freundin, »er kann doch nichts dafür.« Und zu mir: »Aber eure platonischen Körper sind nur ein müder Abklatsch von unseren. Pass auf.«

Auf dem Boden vor mir erschien ein massives Dodekaeder. »Das ist das mittlere Dodekaeder.« Klack, saß auf einer seiner Seitenflächen ein gleichartiger Körper und – klack – auf der Nachbarfläche ein dritter. »Eigentlich müsste ich jetzt auf jede Fläche des mittleren Dodekaeders ein weiteres aufsetzen; aber die beiden reichen für den Anfang. Du siehst die keilförmige Lücke zwischen den äußeren Körpern?«

»Sicher.«

»Jetzt passiert etwas ganz Einfaches. Ich knicke die äußeren Dodekaeder gegen das mittlere, und zwar entlang der gemeinsamen Grenzfläche, bis sich die beiden berühren. Und schon ist die Lücke zu.«

Es knirschte ein bisschen – und dann waren die beiden äußeren Dodekaeder meinem Blick entschwunden.

»Er sieht wieder nichts«, kommentierte eine Kollegin aus dem $\mathbb{R}^4$. »Dazu ist er doch zu dünn.«

»Schon gut«, erwiderte meine erste Gesprächspartnerin. »Deswegen mache ich doch das Licht an. Schau dir den Overheadklotz an.«

Gleichmäßiges Licht durchflutete den Klotz; mit einem kurzen Wischen war die Zeichnung aus seinem Inneren verschwunden, und es erschien das Abbild der drei Dodekaeder, ohne irgendeine Lücke zwischen ihnen. Allerdings sahen zwei von ihnen ein bisschen verzerrt aus.

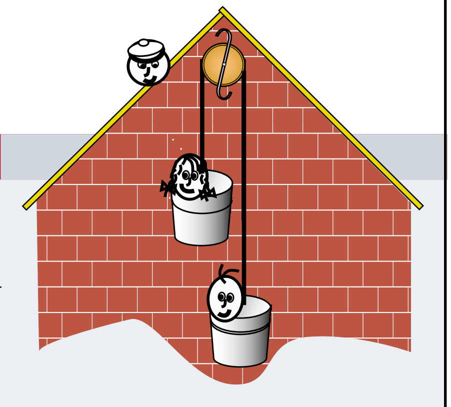
»Ich habe jetzt ◆halb der drei Körper eine punktförmige Lichtquelle angeknipst. Wenn dir einige von ihnen verzerrt vorkommen, liegt das an der Perspektive.«

Dann hielt sie sich mit weiteren Erläuterungen nicht auf. Es machte klack, klack, klack, … Im Original sah ich nichts davon, aber in der Projektion in den Overheadklotz fügte sich ein Dodekaeder nach dem anderen zu den bereits vorhandenen, lückenlos, versteht sich. Die einzelnen Körper wurden immer größer und immer verzerrter: Hinter einer riesengroßen Fünfecksfläche ver- ▷

PREISRÄTSEL

Alles im Eimer?

Von Pierre Tougne



Dachdeckermeister Alois und seine beiden Lehrlinge Bernd und Christa sitzen auf dem Dach eines Hauses fest. Kurz bevor sie mit ihrem Werkzeugkasten die Leiter herabsteigen wollten, hat Stukkateur Schluri diese einfach eingepackt. Glücklicherweise steht ihnen ein sehr einfacher Lastenaufzug zur Verfügung. Er besteht aus zwei großen, gleich schweren Eimern, die mit einem Seil verbunden sind. Das Seil ist über eine Rolle am First des Hauses geführt. Ein einzelner Eimer kann nicht mehr als zwei Personen oder eine Person und den Werkzeugkasten tragen.

Die Fahrt mit dem Aufzug geschieht weit gehend ungebremst der Schwerkraft folgend. Keiner der drei Handwerker kann eingreifen. Wenn der Unterschied der beiden gefüllten Eimer mehr als zehn Kilogramm beträgt, ist mit einer so ruppigen Landung zu rechnen, dass die Passagiere Schaden nehmen könnten. Dagegen hält der Werkzeugkasten jede Landung problemlos aus.

Alois wiegt 85 kg, Bernd 50 kg, Christa 40 kg und der Werkzeugkasten 30 kg. Am Anfang ist ein Eimer oben, der andere ist am Boden.

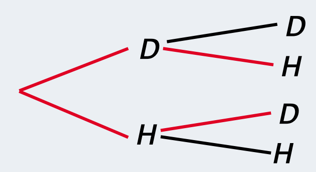
Was müssen die drei Handwerker der Reihe nach tun, um mitsamt dem Werkzeugkasten wohlbehalten den Boden zu erreichen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Briefbeschwerer »Evolution Mensch«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. November 2004, eingehen.

Lösung zu »Chancengleichheit« (September 2004)

Das Publikum setzt sich aus 990 Damen und 946 Herren zusammen.



Die Anzahl der Damen sei mit d, die der Herren mit h bezeichnet. Die gesamte Zuschauerzahl beträgt also $h+d$. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die erste zufällig ausgewählte Person eine Dame ist, beträgt $d/(d+h)$. Bei der nächsten Wahl wird mit Wahrscheinlichkeit $h/(d+h-1)$ ein Herr ausgewählt (es steht eine Dame weniger zur Auswahl). Die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis »erst Dame, dann Herr« (oberer roter Zweig im Diagramm) ist das Produkt dieser Wahrscheinlichkeiten.

Analog hat der untere rote Zweig die Wahrscheinlichkeit $h/(d+h)\cdot d/(d+h-1)$ für sich. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten beider Äste soll gleich 1/2 sein. Diese Bedingung ergibt nach einigen Umformungen:

$$(d-h)^2=d+h$$

Damit diese Gleichung mit natürlichen Zahlen gelöst werden kann, muss die gesamte Zuschauerzahl eine Quadratzahl sein. $1936=44^2$ ist die einzige Quadratzahl zwischen 1900 und 2000. Da folglich $d-h=44$ gilt, ist die Lösung nur noch Formsache.

Die Gewinner der fünf »Wendekreisel« sind Claudia Karle, München; Lutz Dressler, Erkrath; Martina Wassenberg, Wiesbaden; Volker Crystalla, Braunschweig; und Christine Jost, Dresden.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ schwanden die elf anderen geradezu. Nachdem es eine geraume Zeit geklackt hatte, kam das letzte Dodekaeder hinzu und verdeckte alle anderen. Es war sehr groß, aber völlig unverzerrt.

»Das ist das 120-Zell, das Prachtstück unter unseren platonischen Körpern. Es besteht aus 120 Dodekaedern. An jede Ecke grenzen vier von ihnen, an jede Kante dreie, und alle sind genau gleich, obgleich es für dich nicht so aussieht. Innen ist es übrigens hohl.«

Man drehte das Prachtstück um verschiedene Ebenen; im $\mathbb{R}^4$ finden Drehungen nicht um Achsen, sondern stets um Ebenen statt. In meiner beschränkten Weltsicht konnte ich die vielen Symmetrien, über die das 120-Zell verfügt, nur mühsam erahnen. Zunächst hatte die Lampe genau ◆halb des Körpermittelpunkts des ◆sten Dodekaeders gehangen. So gesehen wirkte auch die Projektion sehr symmetrisch. Aber man konnte das ganze Ding auch so drehen, dass eine Fläche, eine Kante oder eine Ecke der Lichtquelle am nächsten waren, genauer: dass ein Flächenmittelpunkt, ein Kantenmittelpunkt beziehungsweise ein Eckpunkt auf die ◆wärts gerichtete Koordinatenachse, die senkrecht auf »meinem« $\mathbb{R}^3$ stand, zu liegen kamen. Je nach Orientierung kamen die verschiedensten Symmetrien des Körpers zum Vorschein. ◁

Teil II erscheint im Dezemberheft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Flacherland. Die unglaubliche Reise der Vikki Line durch Raum und Zeit. Von Ian Stewart. C. H. Beck, München 2003

Online in die vierte Dimension. Von Hans Borucki. Aulis, Köln 2000

Dimensionen. Figuren und Körper in geometrischen Räumen. Von Thomas F. Banchoff. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1991

Die Wunderwelt der vierten Dimension. Ein Kursbuch für Reisen in die höhere Wirklichkeit. Von Rudy Rucker. Scherz, München 1987

Das Planiversum. Computerkontakt mit einer dreidimensionalen Welt. Von Alexander K. Dewdney. Zsolnay, Wien 1985

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Produktive Fehlschläge

Eine wissenschaftliche Arbeit wurde abgelehnt – normalerweise ein Rückschlag, in meinem Fall der Auslöser für ein fruchtbares Forschungsprogramm.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von Ernst Fehr

Ende der 1980er Jahre schrieb ich einen Artikel über unfreiwillige Arbeitslosigkeit, auf den ich große Stücke hielt. Nach meiner Überzeugung beantwortete er einige wesentliche Fragen, die von den Ökonomen schon seit Jahrzehnten diskutiert wurden. Umso enttäuschter war ich, als die Gutachter verschiedener Zeitschriften ihn ablehnten.

Der Begriff »unfreiwillige Arbeitslosigkeit« *(involuntary unemployment)* scheint zunächst überflüssig wortreich zu sein; wer ist schon gerne freiwillig arbeitslos? Gemeint ist jedoch ein Zustand des Arbeitsmarkts, der auf Konsumgütermärkten nicht auftritt und den man als Marktversagen bezeichnen kann.

Wenn ein Anbieter seine Ware zu dem von ihm geforderten Preis nicht loswird, kann er entweder mitsamt der Ware den Markt verlassen oder mit dem Preis heruntergehen, bis er einen Käufer findet. Entsprechend würde ein Arbeitsloser in Zeiten schlechter Wirtschaftslage seine Arbeitskraft entweder gar nicht oder zu einem so niedrigen Lohn feilbieten, dass er selbst in dieser Situation für einen potenziellen Arbeitgeber profitabel wäre. Wenn er dann trotzdem nicht eingestellt wird, nennt man das unfreiwillige Arbeitslosigkeit. Es geht also gerade nicht um den zurzeit in Deutschland intensiv diskutierten Fall, dass ein Arbeitsloser einen Job nicht annimmt, weil er vom Arbeitsamt besser bezahlt wird.

Dieser unerfreuliche Zustand, dass ein für beide Seiten profitabler Vertrag nicht zu Stande kommt, ist in Zeiten wirtschaftlichen Abschwungs unvermeidlich, sollte aber eigentlich ein vorübergehendes Phänomen sein: Wenn die Nachfrage nach Arbeitskräften rasch zurückgeht, finden die freigesetzten Arbeitnehmer auch zu niedrigeren Löhnen nicht sofort wieder Beschäftigung. Aber kann es unfreiwillige Arbeitslosigkeit auch im Gleichgewicht geben, das heißt in einer längere Zeit unveränderten Wirtschaftslage? Oder – eine noch schwierigere und politisch brisantere Frage – selbst dann, wenn das Wirken der Marktkräfte weder durch Gewerkschaftsmacht noch von Mindestlohnvorschriften eingeschränkt wird? Der große britische Ökonom John Maynard Keynes hielt das für möglich und gab gute Gründe dafür an, aber die Wirtschaftswissenschaftler streiten sich seit Jahrzehnten darüber – bis heute.

Das waren die Fragen, die ich mit meiner damaligen Arbeit »Fair wages and unemployment« (Faire Löhne und Arbeitslosigkeit) beantwortet zu haben glaubte. Der Grundgedanke war folgender: Wer sich für unterbezahlt hält, strengt sich nicht besonders an. Wenn daher ein Arbeitsloser den marktüblichen Lohn zum Maßstab für eine faire Entlohnung nimmt, wird er einen schlechter bezahlten Job zwar akzeptieren, aber dann eher schlechte Leistungen erbringen. Das weiß der Arbeitgeber auch und stellt ihn gar nicht erst ein. Allgemein schrecken Arbeitgeber in der Regel davor zurück, bestehende Löhne zu kürzen oder Arbeitskräfte zu einem Lohn einzustellen, der unter dem üblichen Niveau liegt: Sie müssen fürchten, ein schlechtes Geschäft zu machen.

Eigentlich ist Arbeitslosigkeit immer unfreiwillig. In der Wirtschaftswissenschaft spricht man jedoch erst dann von unfreiwilliger Arbeitslosigkeit, wenn ein Arbeitssuchender keine Stelle findet, obwohl er bereit ist, zu einem für den Arbeitgeber profitablen, möglicherweise sehr niedrigen Lohn zu arbeiten.

Maximieren – egal was ...

Meine Arbeit stellte also die Hypothese auf, dass Fairnessmotive die Funktion des Arbeitsmarktes beeinflussen. Diese Idee ist nicht neu, wurde aber von den etablierten Wirtschaftswissenschaften lange ignoriert. Ökonomen legen, wie andere Leute, privat den größten Wert auf Fairness. Sie wären zum Beispiel äußerst unglücklich, wenn sie schlechter bezahlt würden, als sie es für angemessen halten. Aber dienstlich, in der ökonomischen Modellbildung, halten sie Fairness für belanglos.

Darüber hinaus widersprach meine Hypothese einer der stärksten Konventionen, die in der Wirtschaftswissenschaft (wie in jeder anderen Wissenschaft auch) lebendig sind, und ▷

▷ zwar der eingefahrenen Vorstellung, wie ein gutes ökonomisches Modell auszusehen habe: Es soll Vorhersagen auf Basis der Annahme treffen, dass alle Entscheidungsträger wohl definierte Zielfunktionen maximieren. Offiziell ist es nicht so wichtig, was die Entscheidungsträger maximieren, Hauptsache, sie maximieren irgendetwas. Aber in der Praxis haben die Ökonomen sehr dezidierte und kaum hinterfragte Vorstellungen davon, was als adäquate Zielfunktion zu gelten hat – Fairness gehört jedenfalls nicht dazu. Genau das aber maximierten die Subjekte in meinem Modell. Ich war daher nicht allzu überrascht, als mehrere der führenden wirtschaftswissenschaftlichen Zeitschriften meinen Artikel ablehnten.



… aber nicht gerade Fairness

Vielleicht hätte mein Werk eher Gnade bei den Gutachtern gefunden, wenn es sich durch einen Überraschungseffekt oder besondere mathematische Eleganz hervorgetan hätte (einer der Gutachter argumentierte, der Abstand zwischen den Annahmen und den Schlussfolgerungen sei zu klein, um den Aufsatz interessant zu machen). Aber eigentlich kommt es nicht darauf an, ob eine Theorie einfach oder kompliziert, elegant oder plump, schön oder hässlich ist. Solche Erwägungen sind zweitrangig, wahrer Wissenschaft fremd. Meistens sind sie nur ein mickriges Feigenblatt, das einen entscheidenden Mangel verdecken soll: den an überzeugender empirischer Evidenz.

Eine Theorie gewinnt ungeheuer an Wert, wenn sie Bestätigung in der Realität findet. Da ich trotz aller Ablehnungen von der Bedeutung meiner Arbeit überzeugt war und ihr Geltung in der etablierten Wissenschaft verschaffen wollte, begab ich mich auf die Suche nach Methoden, um die Wirkung von Fairnessmotiven empirisch nachzuweisen.

Im Rückblick stellt sich diese Suche als Wendepunkt meiner wissenschaftlichen Karriere dar. Mein Forschungsprogramm wurde vollkommen umgestaltet. Ich verwandelte mich von einem Arbeitsmarkttheoretiker in einen experimentellen Ökonomen.

In den späten 1980er Jahren gab es bereits eine umfangreiche Literatur zu Fairness in bilateralen Verhandlungen. Diese Arbeiten gingen auf die bahnbrechenden Ultimatumspiele von Werner Güth zurück, der heute Direktor des Max-Planck-Instituts zur Erforschung von Wirtschaftssystemen in Jena ist (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52). Ich interessierte mich jedoch dafür, ob Motive der Fairness Wettbewerbsmärkte beeinflussen.

Zu diesem Markttyp hatten experimentelle Ökonomen bereits Tausende von Experimenten durchgeführt (Spektrum der Wissenschaft 2/1993, S. 68 und 5/2004, S. 60). Dabei war man zu der allgemeinen Ansicht gelangt, dass in solchen Märkten Fairness irrelevant sei. Allerdings war in den Wettbewerbsmärkten dieser Experimente die Arbeitsleistung – allgemeiner: die zu handelnde Ware – vertraglich vollständig festgelegt; es ging nur noch um deren Preis. Das war in der ökonomischen Umgebung, von der mein abgelehnter Aufsatz handelte, gerade nicht der Fall.

Zum Glück erhielt ich Forschungsmittel, mit denen ich zwei hervorragende Mitarbeiter anstellen konnte: Georg Kirchsteiger und Arno Riedl, die heute Professoren in Maastricht beziehungsweise Amsterdam sind. Zusammen entwarfen wir ein Experiment, das genau die Umgebung meiner Theorie abbildete, insbesondere dass die Arbeitsleistung nicht vertraglich vereinbart werden kann.

Wir konnten die Resultate unseres Pilotexperiments kaum glauben! Wir sahen, was wir nur in unseren kühnsten Träumen erhofft hatten: Fairnessmotive erzeugten eine starke Behinderung der Wettbewerbskräfte und hielten die Löhne beträchtlich über dem Wettbewerbsniveau. Darüber hinaus veranlassten Lohnkürzungen die Arbeitnehmer, ihre Arbeitsleistung zu reduzieren (wie von meiner Theorie vorhergesagt), wodurch derartige Maßnahmen für die Arbeitgeber unprofitabel wurden. Jetzt hatten wir die Überraschung, die eine Publikation rechtfertigte.

Meine spätere Arbeit und die von vielen anderen legen nahe, dass Fairnessmotive viele andere Aspekte des ökonomischen und sozialen Lebens durchdringen. Sie beeinflussen den Wettbewerb und die Zusammenarbeit zwischen und innerhalb von Unternehmen, sie entfalten ihre Wirkung bei internationalen Verhandlungen, der Bereitstellung öffentlicher Güter und der Ausbeutung von Ressourcen in gemeinschaftlichem Eigentum; und sie liegen vielen politischen Konflikten zu Grunde. Darüber hinaus spielten Fairnessnormen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Kooperation in menschlichen Gesellschaften.

Was als Forschung über unfreiwillige Arbeitslosigkeit begann, wurde zur Grundlagenforschung über die Natur des menschlichen Altruismus. Samuel Bowles und Herbert Gintis, Professoren am bekannten Santa Fe Institute in New Mexico, prägten den Begriff der starken Reziprozität, um die weit verbreitete menschliche Neigung, Helfer zu belohnen und Betrüger zu bestrafen, zu beschreiben. Heute inspiriert dieses Konzept Anthropologen, Zoologen, evolutionäre Biologen und evolutionäre Psychologen gleichermaßen. Ich wünsche ihnen Erfolg und ein paar produktive Fehlschläge. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Ernst Fehr ist Direktor des Instituts für Empirische Wirtschaftsforschung an der Universität Zürich.

Dieser Artikel erschien erstmals unter dem Titel »The productivity of failures« in Nature, Bd. 428, S. 701, 2004.

A theory of fairness, competition and cooperation. Von Ernst Fehr und Klaus Schmidt, in: Quarterly Journal of Economics, Bd. 114, S. 817 (1999)

Does fairness prevent market clearing? Von Ernst Fehr, Georg Kirchsteiger und Arno Riedl, in: Quarterly Journal of Economics, Bd. 108, S. 437 (1993)

Weitere Literatur finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ein Universum voller Scheiben

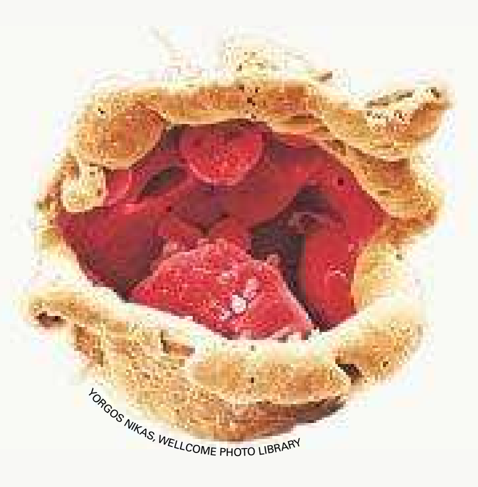
Rotierende Scheiben aus Gas umgeben sowohl junge Sterne als auch gigantische Schwarze Löcher. Neue Forschungen geben einen Einblick in die Dynamik dieser Akkretionsscheiben

DON DIXON

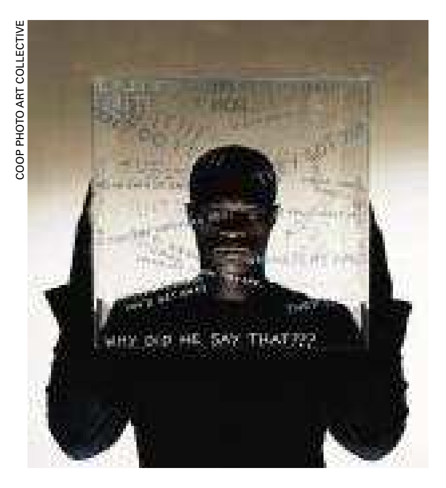
WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Herausforderung Stammzelltherapie

So groß die wissenschaftlichen Hürden noch sind, bis menschliche Stammzellen für Therapien zur Verfügung stehen werden – die Forscher glauben sie schon bald überwinden zu können



YORGOS NIKAS, WELLCOME PHOTO LIBRARY



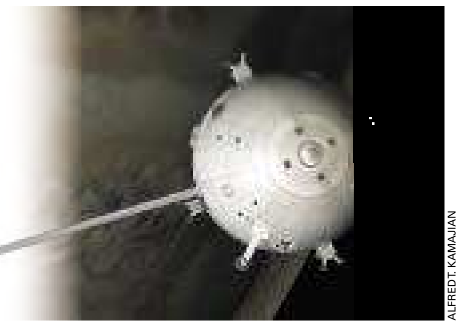
COOP PHOTO ART COLLECTIVE

Schizophrenie – Aussicht auf bessere Behandlung

Mediziner verstehen immer genauer, welche Signalnetzwerke im Gehirn bei Schizophrenen gestört sind. Sie entwickeln bereits Medikamente, die gezielter wirken als bisherige Arzneimittel

Drahtseilakt im Weltraum

Per Drahtseil verbundene, umeinander kreisende Raumschiffe können Strom und Schub aus dem Magnetfeld der Erde oder anderer Planeten gewinnen. Zudem erzeugen sie künstliche Schwerkraft



ALFRED T. KAMAJIAN